



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Alinne Pereira de Oliveira**

## **Alocação Resiliente de Equipamentos BPL para Comunicação em Redes Elétricas de Média Tensão**

VITÓRIA-ES  
ABRIL/2017



**Alinne Pereira de Oliveira**

## **Alocação Resiliente de Equipamentos BPL para Comunicação em Redes Elétricas de Média Tensão**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Telecomunicações.

Linha de pesquisa: Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira  
Rocha  
Universidade Federal do Espírito Santo -  
UFES

Coorientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva  
Universidade Federal do Espírito Santo -  
UFES

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
VITÓRIA-ES  
ABRIL/2017



**Alinne Pereira de Oliveira**

# **Alocação Resiliente de Equipamentos BPL para Comunicação em Redes Elétricas de Média Tensão**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Telecomunicações.

Aprovado em 20 de abril de 2017

---

**Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira  
Rocha**  
Orientador

---

**Prof. Dr. José Leandro Félix Salles**  
Universidade Federal de Espírito Santo  
Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Nunes**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador Externo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
VITÓRIA-ES  
ABRIL/2017



---

Alinne Pereira de Oliveira    Alocação Resiliente de Equipamentos BPL para  
Comunicação em Redes Elétricas de Média Tensão/ Alinne Pereira de Oliveira. –  
Vitória-ES, Abril/2017-    101 p. : il.(red); 30 cm.  
Orientador:Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha  
Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo - UFES,  
Abril/2017.  
1. PLC 2. Smartgrid 3. Banda Larga. I. Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira  
Rocha. II. Universidade Federal do Espírito Santo. III. LABTEL. IV. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
CDU 02:141:005.7

---

À minha mãe, meu maior exemplo.



# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à Ele, o meu Deus, meu Senhor e Salvador, pelo dom da vida e por guiar todos os meus passos; Aos meus pais que sempre priorizaram a minha educação e me ofereceram a oportunidade de estudar; À toda minha família pelo apoio, incentivo e amor incondicional; Aos meus amigos, que sempre estão ao meu lado torcendo por minhas vitórias; À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos a mim concedida durante o tempo deste trabalho; À equipe do LabTel (Laboratório de Telecomunicações) da Universidade Federal do Espírito Santo, hoje amigos, que dia-a-dia estavam comigo na luta, pesquisando as melhores formas de testar e analisar o propósito deste trabalho e oferecendo a infraestrutura necessária para a realização do mesmo. Aos meus professores, que sempre estiveram na difícil decisão dos caminhos do conhecimento, em especial aos professores Dr. Jair Adriano Lima Silva e Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha pelos ensinamentos, direcionamentos e paciência durante este trabalho.



*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar. Mas  
o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”  
(Madre Teresa de Calcutá)*

# Resumo

Um dos principais apelos da comunicação de dados por meio da rede elétrica é o baixo custo de implantação desta tecnologia, visto que os cabos elétricos já estão instalados, além da capilaridade que a caracteriza. Com base neste apelo apresenta-se neste trabalho uma metodologia para alocação resiliente de equipamentos PLC (*Power Line Communications*) para comunicação em redes elétricas de média tensão. Sabe-se no entanto que, como as redes elétricas não foram customizadas para fins de transmissão de dados, interferências destrutivas existentes no meio de transmissão atrapalham a comunicação em altas taxas de transferências. Para altas frequências, o canal PLC é caracterizado como um canal com seletividade em frequência provocada pelo fenômeno denominado multipercurso, oriundo das derivações e descasamentos de impedância existentes ao longo o trecho principal de transmissão. Derivações com comprimento na ordem de 10% em relação ao trecho principal tem influência destrutiva sobre o sinal PLC por apresentar menor atenuação do sinal refletido e por isso chamadas na literatura de ramificações interferentes.

Assim sendo, neste trabalho propõe-se uma metodologia para alocar estrategicamente a menor quantidade possível de equipamentos PLC para repetição de sinal considerando-se a presença ou ausência de ramificações interferentes. Além disso, sabendo que as redes elétricas em sua operação e/ou manutenção podem alterar seu cenário topológico e com isso prejudicar ou até mesmo interromper a comunicação de dados, o modelo aqui proposto deverá alocar repetidores de forma atender todos os cenários topológicos que a rede elétrica possa assumir. Outro problema a ser contemplado é a perda de qualquer repetidor sem que a comunicação via a própria rede elétrica seja prejudicada ou até mesmo interrompida.

A metodologia proposta neste trabalho utiliza-se das metaheurísticas Algoritmo Genético e NBPSO (*New Binary Particle Swarm Optimization*) para gerar soluções de boa qualidade na solução do problema de alocação de repetidores em uma rede de comunicação de dados PLC, devido à particularidade do problema abordado.

Além de igualar a quantidade de equipamentos alocados em uma rede real instalada em campo, o Algoritmo Genético proposto designou 14 repetidores PLC na rede elétrica de média tensão do Rio Preto do Oeste situada em São Mateus-ES, que deverá ser contemplada com a tecnologia em um futuro próximo.

**Palavras-chave:** Comunicação de Dados via Rede Elétrica, Alocação de Equipamentos PLC, Algoritmo Genético, NBPSO, Resiliência.

# Abstract

Power line communications (PLC) appears as a good alternative for data communication due to the already installed and pervasive power distribution infrastructure. It is based on this features that, a methodology for resilient allocation of PLC equipments for data communication in medium voltage (MV) networks is proposed in this work. However, because electrical networks were not customized for data transmission purposes, destructive interference exists in the medium to degrades high data rate communications. In the frequencies above 1 MHz, the PLC medium is characterized as a multipath channel caused by the derivations and impedance mismatches that exists along the main transmission segment. Normally called interfering branches, the ramification lengths around 10 % of the main segment have a destructive influence on the PLC signal.

Therefore, a methodology to strategically allocate the lowest quantity of PLC equipments in the MV considering the presence or absence of interfering branches is proposed. Moreover, due to changes in the topology of the electrical MV access network during its operation and/or mantainence, the proposed method should allocate repeaters to fit all the topological scenarios in order to prevent interruptions in the data communications. Another problem contemplated is the loss of any repeater without the powerline communications being impaired or even interrupted.

The methodology proposed in this work uses metaheuristics based on a Genetic Algorithm and on a new Binary Particle Swarm optimization (NBPSO) to generate good solutions to the particular allocation problem addressed in this work.

The same amount of PLC equipments installed in a real network was achieved after the application of the proposed methodology. Using the proposed Genetic Algorithm, the method also successfully designated 14 PLC repeaters for the MV located in Rio Preto do Oeste in São Mateus-ES, which should be addressed with technology in the near future.

**Keywords:** Power Line Communication (PLC), PLC equipment allocation, Genetic Algorithm, New Binary Particle Swarm Optimization, Resilience.



# Lista de Figuras

Figura 1 – Linha do tempo a respeito das pesquisas da tecnologia PLC no LabTel	24
Figura 2 – Sistema Elétrico de Potência. Fonte: [Castor 2016]	28
Figura 3 – Topologia em árvore de uma rede de acesso BPL.	31
Figura 4 – Fluxograma de processamento do algoritmo genético.	35
Figura 5 – Exemplo da operação de cruzamento em um ponto de corte	36
Figura 6 – Exemplo da Operação de mutação	37
Figura 7 – Fluxograma de Processamento do Algoritmo PSO	40
Figura 8 – Fluxograma da Metodologia de implementação de redes de acesso utilizando a tecnologia PLC sobre redes elétricas MT. Em destaque, o bloco objeto deste trabalho. Fonte: [Castor et al. 2016].	44
Figura 9 – Rede MT usada para extrair afirmações importantes ao modelo de alocação de equipamentos utilizada para experimentos relativos à aplicação do conceito de <i>Smart Grids</i> em poços de extração de petróleo <i>onshore</i> . Fonte: [Castor et al. 2016].	45
Figura 10 – Topologia de testes para experimentos relativos à aplicação do conceito de redes inteligentes <i>Smart Grids</i> em poços de extração de petróleo <i>onshore</i> .	46
Figura 11 – Diagrama de blocos da modulação OFDM em banda base usada para avaliação dos efeitos de camada física do sistema BPL experimentado. S/P: Conversão serial para paralelo; PSK: <i>Phase-Shift Keying</i> ; (I)FFT: ( <i>Inverse</i> ) <i>fast Fourier transform</i> ; CP: <i>Cyclic prefix</i> , P/S: Conversão paralelo para serial.	48
Figura 12 – Medidas de resposta impulsiva obtidas a partir do perfil das resposta em frequência dado pelas medidas de SNR nos trechos: (a) HE-TDR1, (b) TDR1-TDR3, (c) TDR3-TDR5 e (d) TDR5-CPE1.	49
Figura 13 – Análise de desempenho do sistema OFDM com modulação 4 e 8- PSK nas subportadoras para comunicação no trecho contendo o equipamento master HE e a repetidora TDR1.	50
Figura 14 – Análise de desempenho do sistema OFDM (modulação 4 e 8-PSK) para comunicação BPL nos trechos: (a) TDR1 - TDR3, (b) TDR3 - TDR5.	51
Figura 15 – Exemplo de uma rede elétrica onde pretende-se alocar repetidores para atendimento da comunicação BPL.	59
Figura 16 – Exemplo de como funciona a penalização de sistemas de comunicação PLC para atendimento à 2 CPE's com modems repetidores alocados nos nós 2 e 7.	60

Figura 17 – Exemplo de como funciona a penalização de sistemas de comunicação PLC para atendimento à 2 CPE's com modem repetidor alocado no nó 5.	60
Figura 18 – Exemplo de como funciona a penalização de sistemas de comunicação PLC para atendimento à 2 CPE's com modems repetidores alocados nos nós 4 e 6.	61
Figura 19 – Pseudocódigo para o AG	63
Figura 20 – Pseudocódigo para o NBPSO	64
Figura 21 – Sistema de testes IEEE de 13 barras adaptado	69
Figura 22 – Sistema de testes IEEE 13 barras em atendimento a 2 CPE's.	70
Figura 23 – Sistema de testes IEEE 13 barras em atendimento a múltiplos CPE's.	70
Figura 24 – Sistema de testes IEEE de 37 barras	71
Figura 25 – Sistema de testes IEEE 37 barras em atendimento a 2 CPE's.	72
Figura 26 – Sistema de testes IEEE 37 barras em atendimento a múltiplos CPE's.	73
Figura 27 – Sistema de testes IEEE de 123 barras	74
Figura 28 – Sistema de testes IEEE 123 barras em atendimento a 2 CPE's	74
Figura 29 – Sistema de testes IEEE 123 barras em atendimento a múltiplos CPE's	75
Figura 30 – Resultado dos testes para o sistema IEEE1 3 barras para atender 2 CPE's.	83
Figura 31 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 13 barras para atender 7 CPE's.	84
Figura 32 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 37 barras para atender 2 CPE's.	85
Figura 33 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 37 barras para atender 14 CPE's.	86
Figura 34 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 123 barras para atender 2 CPE's.	86
Figura 35 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 123 barras para atender 41 CPE's.	87
Figura 36 – Topologia da rede <i>Broadband PowerLine</i> aplicada nos testes de campo de estudos anteriores. Fonte: [Castor et al. 2016].	88
Figura 37 – Diagrama ilustrativo contendo informações técnicas necessárias para o projeto de alocação de repetidores para comunicação PLC nas redes elétricas de média tensão.	89
Figura 38 – Gráfico de convergência do Algoritmo Genético para a rede elétrica RP com 500 iterações.	91
Figura 39 – Rede elétrica de MT RPO.	91
Figura 40 – Topologia proposta para o problema de alocação de modems na rede elétrica RPO de acordo com a metodologia proposta.	93
Figura 41 – Gráfico de convergência do Algoritmo Genético para a rede elétrica RPO com 500 iterações.	94
Figura 42 – Topologia proposta para o problema de alocação de modems na rede elétrica RPO adotando novas distâncias entre os equipamentos PLC.	96



# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros OFDM especificados no padrão OPERA. . . . .	31
Tabela 2 – Termos utilizados no PSO . . . . .	38
Tabela 3 – Medida média de Taxa de transmissão durante 1 ano . . . . .	52
Tabela 4 – Alteração nas configurações no sistema IEEE-13 barras . . . . .	70
Tabela 5 – Alteração nas configurações no sistema IEEE 37 barras . . . . .	72
Tabela 6 – Alteração nas configurações no sistema IEEE 123 barras . . . . .	73
Tabela 7 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 2 CPE's. . . . .	77
Tabela 8 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 7 CPE's no sistema IEEE-13, 14 CPE's no sistema IEEE-37 e 41 CPE's no sistema 123. . . . .	77
Tabela 9 – Localização dos modems TDR para ambas simulações realizadas, considerando a presença de ramificações interferentes, de acordo com as metaheurísticas utilizadas. . . . .	77
Tabela 10 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, com reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 2 CPE's. . . . .	78
Tabela 11 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, com reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 7 CPE's no sistema IEEE-13, 14 CPE's no sistema IEEE-37 e 41 CPE's no sistema 123. . . . .	79
Tabela 12 – Localização dos modems TDR para ambas simulações realizadas, considerando alterações topológicas da rede elétrica, de acordo com as metaheurísticas utilizadas. . . . .	79
Tabela 13 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e com perda de 1 TDR para instalação de 2 CPE's. . . . .	81

Tabela 14 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e com perda de 1 TDR para instalação de 7 CPE's no sistema IEEE-13, 14 CPE's no sistema IEEE-37 e 41 CPE's no sistema 123. . . . .	81
Tabela 15 – Localização de TDR Críticos para alocação de modems PLC com o requisito de perda de 1 TDR. . . . .	81
Tabela 16 – Localização dos modems TDR para ambas simulações realizadas, considerando a existência de ramificações interferentes com a possibilidade de perda de 1 TDR, de acordo com as metaheurísticas utilizadas. . . .	82
Tabela 17 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 13 barras para atender 2 CPE's. . . . .	83
Tabela 18 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 13 barras para atender 7 CPE's. . . . .	84
Tabela 19 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 37 barras para atender 2 CPE's. . . . .	85
Tabela 20 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 37 barras para atender 14 CPE's. . . . .	85
Tabela 21 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 123 barras para atender 2 CPE's. . . . .	87
Tabela 22 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 123 barras para atender 41 CPE's. . . . .	87
Tabela 23 – Resultado da metodologia aplicada ao sistema RP projetado para solucionar o problema de alocação de modems PLC. . . . .	90
Tabela 24 – Resultado da metodologia aplicada ao sistema RPO projetado para solucionar o problema de alocação de modems PLC. . . . .	92
Tabela 25 – Quantidade de modems TDR's alocados no sistema RPO em atendimento à 6 CPE's com adaptação das distâncias de 1km para trechos sem ramificações interferentes e 500m para trecho que possuem ramificações interferentes. . . . .	95

# Lista de Abreviaturas

AG	Algoritmo Genético
ASK	<i>Amplitude Shift keying</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	Taxa de Erro de Bit
BPL	<i>Broadband Power-Line</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BPSO	<i>Binary Particle Swarm Optimization</i>
CENELEC	<i>(Comité Européen Normalisation Electrotechnique)</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
DP	Desvio Padrão
FDR	<i>Frequency Division Repeater</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
HE	<i>Head-End</i>
ICI	<i>Inter Channel Interference</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISI	<i>Inter symbol Interference</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
MT	Média Tensão
NBPLC	<i>Narrowband Power-Line Communication</i>
NBPSO	<i>New Binary Particle Swarm Optimization</i>

NP *Nondeterministic Polynomial Time*

OFDM Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais

OOK *On-Off Keying*

OPERA *Open PLC European Research Alliance*

PLC *Power-Line Communication*

PSK *Phase Shift Keying*

PSO *Particle Swarm Optimization*

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying*

SNR *Signal Noise Ratio*

TDM *Time Division Multiplexing*

TDR *Time Division Repeater*

VNS *Variable Neighbourhood Search*

# Sumário

<b>1 – Introdução</b>	<b>21</b>
1.1 Breve Histórico da Tecnologia PLC	23
1.2 Objetivo Geral	24
1.3 Objetivos Específicos	25
1.4 Histórico e Principais Contribuições	25
1.5 Estrutura da Dissertação	26
<b>2 – A Comunicação de Dados via Rede Elétrica</b>	<b>27</b>
2.1 A Tecnologia de Comunicação em Banda Estreita - NB-PLC	28
2.2 A Tecnologia de Comunicação em Banda Larga - BPL	29
2.3 Especificação OPERA para o Modelo de Camada Física	30
<b>3 – Metaheurísticas: Aspectos Gerais</b>	<b>33</b>
3.1 Algoritmos Genéticos	33
3.1.1 Seleção	34
3.1.2 Cruzamento	36
3.1.3 Mutação	36
3.2 <i>New Binary Particle Swarm Optimization</i> - NBPSO	36
3.2.1 O Algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i> - PSO Padrão	37
3.2.2 O Algoritmo <i>Binary Particle Swarm Optimization</i> - BPSO	39
3.2.3 O Algoritmo <i>New Binary Particle Swarm Optimization</i> - NBPSO	41
<b>4 – A Metodologia Proposta para Alocação de Modems BPL</b>	<b>43</b>
4.1 Descrição da Rede Elétrica MT usada para Levantamento dos Parâmetros Físicos do Modelo de Alocação	43
4.2 Simulação e Avaliação do Desempenho do Sistema BPL em Canais com Respostas Impulsivas Medidas em Campo	47
4.2.1 Levantamento das Respostas Impulsivas	48
4.2.2 Análise dos Desempenhos	50
4.2.3 Levantamento de Informações de Camada Física Importantes para a Metodologia de Alocação de TDRs	52
4.3 Modelagem Matemática do Problema de Alocação Analisado	53
4.4 Função da Avaliação	57
4.5 Solução do Problema via Algoritmo Genético	60
4.6 Solução do Problema via NBPSO	63

<b>5 – Descrição dos Testes e Análise dos Resultados . . . . .</b>	<b>67</b>
5.1 Dados dos Sistemas de Testes IEEE Utilizados . . . . .	68
5.2 Testes nos Sistemas IEEE com Análise de Presença de Ramificações Inter- ferentes . . . . .	75
5.2.1 Testes Sem Reconfiguração de Topologia e Sem Perda de 1 TDR .	76
5.2.2 Testes Com Reconfiguração de Topologia e Sem Perda de 1 TDR	78
5.2.3 Testes Sem Reconfiguração de Topologia e Com Perda de 1 TDR	79
5.2.4 Análise Comparativa dos Resultados dos Sistemas de Teste IEEE	82
5.3 Aplicação da Metodologia em Redes Elétricas Reais . . . . .	88
<b>6 – Conclusões e Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>Referências . . . . .</b>	<b>99</b>

# 1 Introdução

Investir em tecnologias de baixo custo de implementação, operação e manutenção é premissa básica para as redes inteligentes do futuro, as *Smart Grids*. A redução de custos é um processo quase natural para a sobrevivência e crescimento das empresas. Desta forma, fabricantes de equipamentos de Telecomunicações a cada dia investem em novas tecnologias que assegurem produtos de alta capacidade de transmissão, maior eficiência espectral, maior confiabilidade e principalmente menores custos.

Perante a popularização da internet, onde informações *on line* das mais diversas ordens, desde entretenimento, acesso às redes sociais, *e-commerce*, serviços bancários e muitos outros são solicitadas pelos usuários com uma maior exigência quanto à velocidade e qualidade, porém com custos reduzidos. Além disso, neste contexto enquadra-se o conceito de internet das coisas IoT (*Internet of Things*) que integra uma gama de dispositivos tais como, câmeras de videomonitoramento, sensores em geral, eletrodomésticos, entre outros, com o propósito da automação residencial, automação industrial, *Smart Grids* e muitas outras aplicações [Lobo 2015]. De posse destas necessidades, promover comunicação de dados via rede elétrica torna-se uma ferramenta minimizadora de custos, já que a infraestrutura (cabeario) altamente capilar (que possibilita grande capacidade de penetração) necessária para a comunicação já está disponível.

A tecnologia que utiliza rede elétrica para comunicação de dados, conhecida como PLC (*Power-Line Communications*) cada vez mais é utilizada no contexto das *Smart Grids*, uma vez que sua principal vantagem é a utilização de cabos elétricos já instalados para fornecer recursos de comunicação, promovendo transmissão de dados em altas taxas em banda larga sem requerer um alto custo de investimento, além de poder contar com a alta capilaridade da rede elétrica. Com isso, as redes PLC vem obtendo destaque em processos produtivos por ser uma ferramenta redutora de custos, de maximização de segurança e eficiência da produção [Cano et al. 2016].

A tecnologia de comunicação de dados em banda estreita que usa a rede elétrica como meio de transporte, denominada na literatura de NB-PLC (*Narrowband Power Line Communication*), é considerada pela comunidade acadêmica uma das tecnologias mais indicadas para aplicações em *Smart Grids* [Papadopoulos et al. 2013], [IEEE et al. 2013]. Esta afirmativa tem como alicerce o baixo custo de implementação demandado pelas redes inteligentes do futuro. E é com base nesta poderosa vantagem que emerge a potencialidade do uso das redes elétricas de média tensão (MT) também como canal de comunicação para redes de transporte de dados em banda larga BPL (*Broadband Power Line*), que têm por finalidade o escoamento de grande quantidade de dados a taxas de transmissão

bem maiores (teoricamente da ordem das centenas de Mega bits por segundo) do que as destinadas na banda estreita [Castor et al. 2016], [Cano et al. 2016].

Entretanto, a rede elétrica não foi idealizada para comunicação de dados, o que a torna hostil para essa transmissão devido à presença de ruídos gerados por motores, fontes chaveadas, roteadores para iluminação, entre outros, sendo por isso questionada quanto à sua qualidade. De fato, variações de topologia, descasamento de impedâncias e atenuações da malha elétrica causam o fenômeno de espalhamento por multipercurso tornando o canal PLC seletivo em frequência, dificultando assim a transmissão.

Devido a isso a técnica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é amplamente utilizada neste tipo de canal por possuir vantagens como tolerância por espalhamento por atraso multipercurso, eficiência espectral, combate à ISI (*Inter-Symbol Interference*) e ICI (*Inter-Channel Interference*) modulação adaptativa, simplicidade na equalização, as quais conferem confiabilidade na comunicação através de redes elétricas de média tensão [EDEV, Group et al. 2007].

Porém, a alocação de equipamentos BPL em uma rede MT continua despertando a atenção de pesquisadores devido principalmente à capilaridade destas redes, com especial ênfase ao quesito reconfiguração que conduz à demanda por resiliência nas *Smart Grids*.

É neste contexto que no presente trabalho propõe-se um algoritmo para alocar estrategicamente a menor quantidade possível de equipamentos PLC para repetição de sinal considerando-se a presença ou ausência de ramificações interferentes. Além disso, sabendo que as redes elétricas em sua operação e/ou manutenção podem alterar seu cenário topológico e com isso prejudicar ou até mesmo interromper a comunicação de dados, o modelo aqui proposto deverá alocar repetidores de forma atender todos os cenários topológicos que a rede elétrica possa assumir. Outro problema a ser contemplado é a perda de qualquer repetidor sem que a comunicação via a própria rede elétrica seja prejudicada.

A metodologia proposta neste trabalho utiliza-se das metaheurísticas Algoritmo Genético e NBPSO (*New Binary Particle Swarm Optimization*) para gerar soluções de boa qualidade na solução do problema de alocação de repetidores em uma rede de comunicação de dados PLC de MT, devido à particularidade do problema abordado.

Além de igualar a quantidade de equipamentos alocados em uma rede real instalada em campo, o algoritmo Genético proposto designou 14 repetidores PLC na rede elétrica de média tensão do Rio Preto do Oeste situada em São Mateus-ES, considerando uma distância máxima de 1 km entre os repetidores e mantendo a taxa de transferência acima de 1 Mbps, ou seja, em patamares superiores a aquelas exigidas por videomonitoramento.



## 1.1 Breve Histórico da Tecnologia PLC

A ideia de aproveitar a rede elétrica como meio para comunicação de dados não é nova. Em 1838, em Londres -Liverpool, foi proposto para medir remotamente níveis de tensão de baterias do sistema de telégrafos utilizando a infraestrutura elétrica existente anunciando a primeira demonstração de sinalização via rede elétrica no Reino Unido. Nos EUA, há relatos de patentes registradas em 1905 que conduziram à comercialização de medidores eletromecânicos e repetidores de sinal em 1913 [Tengdin 1987], [Pavlidou et al. 2003]. Em 1920 quando as cidades já eram todas eletrificadas aconteceu a primeira transmissão de sinais de voz em alta tensão na faixa de frequência compreendida entre 15 - 500 kHz. Em 1930, quase que simultaneamente, começaram a ser utilizadas redes de média e baixa tensão para a transmissão de informação. E assim a tecnologia começou a ser usada para fins como monitoramento e controle de dispositivos elétricos, gerenciamento de consumidores, registro de consumo, telemedicação, entre outros [Anatory e Theethayi 2010].

Em 1935 começaram a ser transmitidos os primeiros sinais de voz por meio da rede elétrica de média e baixa tensão. A multiplexação por divisão de frequência TDM (*Time Division Multiplexing*) foi usada para injetar na rede uma única portadora de áudio, permitindo assim o tráfego de informações de telemetria, o que serviu de alicerce para as tecnologias atualmente usadas em comunicação de dados [Dostert 2001].

Nas décadas seguintes foram empregadas técnicas de modulação mais eficientes com intuito de permitir comunicação bidirecional com a diminuição da potência de transmissão. Na década de 1980, com a comunicação de dados mais eficiente utilizando *hardwares* que implementam códigos corretores de erros, surgiram novos padrões de transmissão tais como a X-10 que utilizava uma portadora de 12 kHz modulada em intensidade conforme a modulação OOK (*On-Off Keying*) para atingir taxas de transmissão de 120 bps. A extinta *EnermetMELkO<sup>TM</sup>* utilizava uma banda de frequências entre 3025 e 4825 Hz e modulação por chaveamento de fase PSK (*Phase Shift Keying*) para alcançar 50 bps de taxa de transmissão [Pavlidou et al. 2003], [Ahola et al. 2003].

A partir de 1990 o interesse por comunicação via rede elétrica em banda larga em redes de distribuição cresceu muito com o surgimento da *Internet*. Cada vez mais pesquisas relacionadas à técnicas de modulação, modelagem do canal, protocolos de comunicação ganham espaço, o que aumenta mais a necessidade de esquemas que utilizam faixa larga de frequência para transporte de dados em alta velocidade, além de demandar o desenvolvimento de padronizações. Em 1991 foi criado pelo CENELEC (*Comité Européen Normalisation Electrotechnique*) um padrão europeu de comunicação via rede elétrica, que regulamentava o uso da faixa de frequência entre 3 e 148,5 kHz para banda estreita com potência máxima de 5 mW, 144 bps de taxa de transferência e distância máxima de 500 metros entre transmissor e receptor.

Para alcançar taxas na ordem de dezenas a centenas de mega bits por segundo (Mbps) novos padrões deveriam ser desenvolvidos [Dostert 2001], [Ahola et al. 2003]. Nos anos 2000 surgiu então a comunicação BPL que utiliza-se da tecnologia PLC para prover serviços de banda larga sobre as redes de baixa e média tensão. Normalmente, esta tecnologia opera na faixa de frequência de 1 a 50 MHz para atingir taxas de transferência máximas de 200 Mbps [Silva 2006], [EDEV, Group et al. 2007].

Desde de 2002, conforme ilustrado na Figura 1, que estudos da tecnologia PLC em banda larga vêm sendo realizados no Laboratório de Telecomunicações da UFES o LabTel [Siqueira et al. 2003], [Silva et al. 2004], [Silva, Salles e Segatto 2005], [Silva 2006]. As pesquisas iniciaram-se com a investigação das viabilidades técnica e econômica da tecnologia em redes de baixa tensão no Brasil. A experiência adquirida pela equipe, principalmente com o domínio da técnica de multiplexação OFDM, permitiu avançar para a aplicação da tecnologia em redes de media tensão. Uma rede BPL em MT encontra-se há mais de três anos funcionando sem interrupção e com taxas médias acima dos 10 Mbps, para telemetria e videomonitoramento em uma zona rural contendo poços de extração de petróleo *on-shore* [Castor et al. 2014], [Castor, Silva e Segatto 2015], [Castor et al. 2016] e [Oliveira et al. 2016].

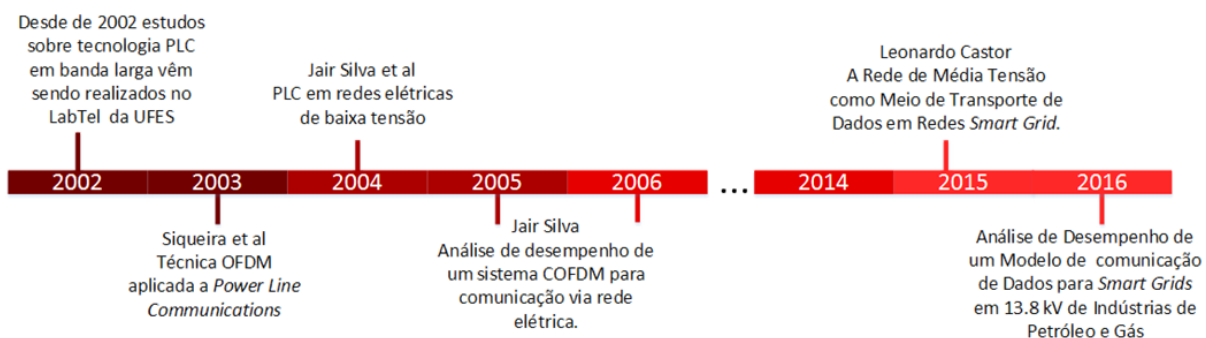


Figura 1 – Linha do tempo a respeito das pesquisas da tecnologia PLC no LabTel

Atualmente o uso da tecnologia PLC tem um forte apelo para investigação e implantação nas *Smart Grids*. Segundo Cano et al [Cano et al. 2016] existem vários estudos experimentais na linha de cidades inteligentes, automação doméstica e aplicações de telemetria que podem alcançar taxas de dados comparáveis às doo WiFi e Ethernet doméstica, tornando-o assim objeto de estudo nas aplicações multimídia *in-home* [Cano et al. 2016].

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor um algoritmo capaz de alocar repetidores BPL em um sistema de comunicação de dados sobre uma rede elétrica MT, considerando critérios de resiliência tais como distância entre equipamentos, reconfiguração

da rede, ramificações que podem influenciar de modo destrutivo para comunicação de dados neste canal e perda de uma repetidora sem qualquer prejuízo à comunicação de dados, de forma a atender a alguns dos requisitos das *Smart Grids*.

## 1.3 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral definido, as particularidades a seguir itemizadas deverão ser atendidas.

- De fato, a rede elétrica durante sua operação e/ou manutenção pode sofrer alterações em sua topologia física, portanto o algoritmo proposto tem que ser capaz de alocar repetidores para atender os modems escravos CPE's em todas topologias adotadas pela rede elétrica referida.
- Com o intuito de tornar a rede de comunicação BPL resiliente o algoritmo propõe ao planejador da rede a possibilidade da perda de um repetidor sem qualquer prejuízo à comunicação.
- O algoritmo a ser implementado deverá considerar as interferências que podem influenciar destrutivamente a comunicação em um canal com multipercursos oriundos das derivações com comprimento da ordem de 10% em relação ao trecho principal.

## 1.4 Histórico e Principais Contribuições

A comunicação de dados via rede elétrica é objeto de estudos do Grupo de Pesquisas em telecomunicações da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o GPTUFES. As primeiras pesquisas foram abordadas em [Siqueira et al. 2003], [Silva et al. 2004], [Silva, Salles e Segatto 2005], [Dezan et al. 2004] e [Silva 2006]. Os resultados apresentados nas publicações [Castor et al. 2014], [Castor, Silva e Segatto 2015] e [Castor et al. 2016], e na Dissertação de Mestrado [Castor 2016] e no trabalho de fim de curso [Natale 2016] contemplam continuidade de pesquisa em tecnologia PLC. Neste contexto inclina-se esta pesquisa com a contribuição da publicação do artigo:

- OLIVEIRA, A. P. et al. *Análise de Desempenho de um Modelo de Comunicação de Dados para Smart Grids em 13,8 kV de Indústrias de Petróleo e Gás*. 12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. Curitiba-PR, 2016.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

Para melhor compreensão deste trabalho seis capítulos integram o presente documento. O Capítulo 2 elucida a tecnologia PLC abordando os principais conceitos e requisitos para comunicação de dados através da rede elétrica. No Capítulo 3 são descritas as metaheurísticas utilizadas neste estudo e suas principais características. O Capítulo 4 é destinado à apresentação de uma proposta de metodologia para alocação de repetidores para redes elétricas de MT, além da descrição do cenário dos testes e a modelagem matemática do problema. Os testes da metodologia aplicada aos experimentos bem como a análise de seus resultados são expostos no Capítulo 5. Por fim o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e propostas para a continuidade da pesquisa.

## 2 A Comunicação de Dados via Rede Elétrica

A ideia do uso da rede elétrica com a finalidade de transmitir dados, voz e vídeo é bastante vantajosa pois possibilita comunicação com reduzido custo de implantação, otimizando recursos exigidos nas edificações já construídas para a popularização da internet, além de diminuir a intervenção na alvenaria e assim reduzir o impacto ambiental. Diante deste cenário a comunicação via rede elétrica PLC, vem sendo alvo de investigação e estudos por ser uma tecnologia atraente para as *Smart Grids*, automação doméstica, cidades automatizadas, telemetria, supervisão e controle, medição remota e até mesmo segurança patrimonial [Cano et al. 2016], [Castor et al. 2016].

Por outro lado, as redes elétricas não foram customizadas para transportar dados o que introduz grandes desafios à essa comunicação. Além de ruídos, interferências eletromagnéticas, variações topológicas da rede elétrica tanto para expansão, melhoramento da rede quanto na manutenção, as redes podem variar em seus mais diversos aspectos como, por exemplo, aspectos construtivos e regulatórios. Na Europa as instalações de média e baixa tensão são subterrâneas e com cabos protegidos, favorecendo a tecnologia PLC por minimizarem os efeitos das interferências eletromagnéticas [Dostert 1997]. Nos EUA e no Brasil utilizam-se cabos aéreos sem proteção fixados em postes na rede de distribuição de energia, tanto para média quanto para baixa tensão [ANEEL 2015].

As redes elétricas no Brasil são divididas em baixa, média e alta tensão como ilustra a Figura 2. As redes de alta tensão são redes de transmissão que ligam grandes geradoras de energia elétrica e está compreendida na classe de tensão de 69 KV até 230 kV. Já as redes de média tensão são redes de distribuição primária de energia de grandes áreas urbanas, indústrias, comércio, entre outros e estão compreendidas na classe de tensão entre 1 kV até 69 kV. As redes de baixa tensão, que são redes de distribuição secundária que interligam os usuários finais disponibilizam sinais de tensão abaixo de 1 kV [ANEEL 2015].

Do ponto de vista da comunicação de dados, a diferença básica entre as redes é quanto ao tipo de ruído predominante. Nas redes de baixa tensão o ruído de fundo e o ruído impulsivo são os mais comuns, já nas redes de média tensão as interferências eletromagnéticas externas provocadas por sinais de rádio frequência na faixa de HF (*High Frequency*) interferem no sinal PLC [Anatory et al. 2007], [Anatory e Theethayi 2010].

A tecnologia PLC que transmite dados em banda larga é chamada de BPL (*Broadband Power-Line*) e em banda estreita é denominada de NB-PLC (*Narrowband Power-Line Communication*). A tecnologia NB-PLC opera na faixa de 9 a 500 kHz, possui capacidade de transmissão em torno de 1 Mbps, podendo alcançar distâncias de 1 Km, sem repetição,

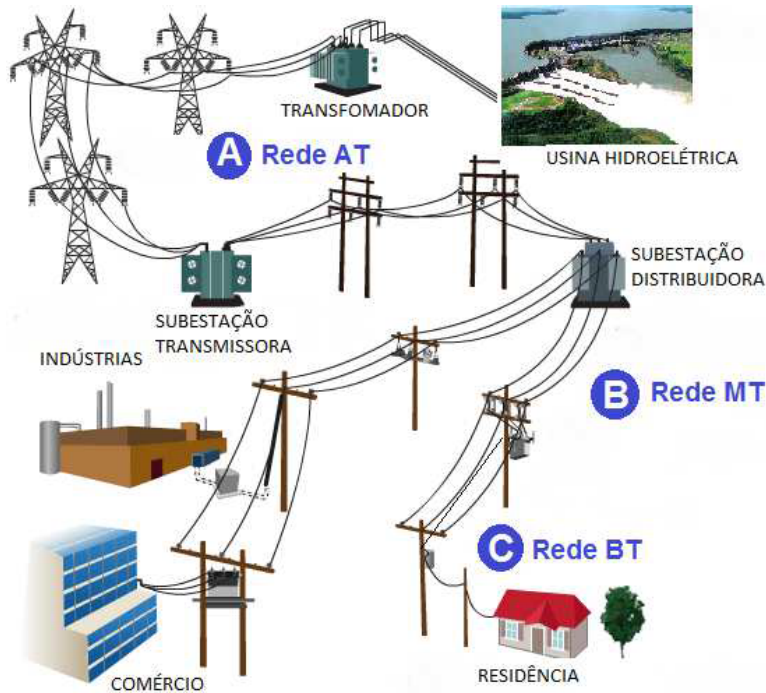


Figura 2 – Sistema Elétrico de Potência. Fonte: [Castor 2016]

sendo muito utilizadas para fins de telemetria, medição remota, controle e comandos elétricos [Castor et al. 2016], [Cano et al. 2016], [Anatory e Theethayi 2010].

A comunicação BPL fornece taxas de transmissão tipicamente acima dos 2 Mbps, o que permite oferecer serviços mais complexos como videomonitoramento, acesso à internet em banda larga, vídeos sob demanda além de todos serviços realizados pela comunicação em banda estreita [Castor et al. 2016], [EDEV, Group et al. 2007]. Por isso, a comunicação de dados em banda larga vem sendo objeto de estudo do grupo de pesquisas em telecomunicações da UFES, o GPTUFES [Silva 2006], [Castor, Silva e Segatto 2015], [Castor et al. 2016], [Oliveira et al. 2016]. Uma visão geral sobre a tecnologia de comunicação BPL, seguindo a padronização Europeia conforme o projeto OPERA (*Open PLC European Research Alliance*) pertencente ao grupo IEEE P1901, é mostrado na Seção 2.2.

## 2.1 A Tecnologia de Comunicação em Banda Estreita - NB-PLC

A tecnologia de comunicação de dados banda estreita utilizando a rede elétrica como meio de transporte é denominada na literatura como NB-PLC e é considerada pela comunidade acadêmica uma das tecnologias mais indicadas para aplicações em *Smart Grids* [Papadopoulos et al. 2013], [IEEE et al. 2013].

O CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) padronizou em uma norma emitida em 1992 quatro bandas de frequência para a comunicação PLC

quais sejam: CENELEC-A, CENELEC-B, CENELEC-C e CENELEC-D. Esse documento especifica limites de banda, sendo que o CENELEC-A compreende a faixa de 3 a 95 kHz e está reservada para os serviços públicos, o CENELEC-B reserva a faixa entre 95 e 125kHz, o CENELEC-C compreende os valores entre 125 e 140 kHz e o CENELEC-D a faixa entre 140 e 148,5 kHz. As bandas CENELEC-B e D só podem ser utilizadas por instalações privadas e o CENELEC-C para acesso múltiplo. Este documento foi decisivo para expansão da tecnologia de banda estreita para automação industrial, casas inteligentes e aplicações em *Smart Metering* [Cano et al. 2016].

Nos EUA a faixa de frequência de operação do NB-PLC está compreendida entre 9 e 490 kHz que são regulamentadas pela comissão Federal de regulamentação dos EUA. No Japão a associação de indústrias e empresas de rádio permite o uso de NB-PLC na faixa entre 10 e 450kHz [Cano et al. 2016].

Os sistemas NB-PLC suportam taxas de transmissão de alguns Kbps, podendo alcançar 1 Mbps em até 1 Km de distância sem a necessidade de uma repetidora do sinal [Anatory e Theethayi 2010], [Castor 2016]. Inicialmente utilizavam modulação baseada em chaveamento de amplitude ASK (*Amplitude Shift Keying*) porém este tipo de modulação é muito sensível a ruídos e logo foi descartada, passando a ser utilizado o esquema de modulação que baseia-se em chaveamento de fase BPSK (*Binary Phase Shift keying*). Porém mais tarde observou-se que equipamentos NB-PLC poderiam operar com esquemas de modulação similares aos de PLC que opera em banda larga, com isso passaram a se beneficiar de esquemas de multiplexação por Divisão de frequências ortogonais OFDM elevando a robustez da comunicação [Cano et al. 2016], [Papadopoulos et al. 2013].

## 2.2 A Tecnologia de Comunicação em Banda Larga - BPL

A tecnologia de comunicação em banda larga, por fornecer altas taxas de transmissão, oferece um leque muito grande de aplicações. Utilizando como meio as redes elétricas de média e baixa tensão, consegue atingir milhões de usuários sem grandes investimentos de cabeamento.

O projeto OPERA também especificou modelos de camada física, de controle de acesso ao meio, da camada LLC (Logical Link Control) e da camada de convergência para transmissão de dados BPL sobre as linhas elétricas para redes de acesso [EDEV, Group et al. 2007].

A tecnologia baseia-se em vários terminais de usuários, chamados de escravos, que recebem e transmitem tráfego de dados conectados a um terminal central, chamado de mestre. Ambos terminais compartilham o mesmo meio tanto para transmissão quanto para a recepção de dados. A padronização OPERA prevê esse compartilhamento de duas maneiras sendo uma através de uma permissão de uso de canal, chamado de *token*. Nesta,



o terminal central envia quadros de dados contendo informação porém, é terminado com o *token* que contém informações do próximo nó de usuário, ou de uma lista priorizada de terminais em ordem pré-determinada, logo após o término da primeira transmissão. O tempo de uso do canal pode ser fixado em um intervalo de tempo determinado pelo nó central. Em casos de não haver fixação do intervalo de tempo, se o terminal não utilizar todo o tempo reservado o direito de transmitir é repassado ao terminal seguinte de uma lista ou até mesmo ser retomado pelo terminal Mestre.

A outra maneira de compartilhar o canal é através de um protocolo de controle de acesso ao meio que tem por objetivo evitar ao máximo a colisões de quadros, o CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). É enviado um pacote CSMA *token* para todos nós terminais que iniciarão uma disputa de prioridade. O vencedor da disputa fica com o direito de transmitir durante um intervalo de tempo, em seguida o direito de transmissão volta ao terminal central iniciando novamente o processo até que não haja mais dados a serem transmitidos [EDEV, Group et al. 2007]. Embora a tecnologia BPL promova altas taxas de transmissão de dados e em diversos tipos de serviços ainda são necessárias outras facilidades como qualidade de serviço QoS (*Quality of service*), a fim de combater alguns efeitos como latência, *jitter* e largura de banda.

A Figura 3 ilustra a topologia das redes BPL. O terminal central, o mestre, chamado de HE (*Head End*) concentra e comanda todo o fluxo de *upstream* e *downstream* da rede e é conectado aos terminais usuários, os escravos, denominados de CPE's (*Customer Premises Equipment*). Para combater atenuação, repetidores TDR (*Time Division Repeater*) e/ou FDR (*Frequency Division Repeater*) são instalados ao longo das linhas a fim de retransmitir o sinal e aumentar sua cobertura. Os repetidores atuam como novos mestres compartilhando o canal alocado entre seus terminais CPE de acordo com o fluxo de tráfego, classe de serviço, origem e destino. Porém em relação ao HE, os repetidores se comportam como escravos. Sendo assim escravo de seu HE ou de um TDR antecessor e mestre de seus escravos ou de um TDR sucessor [EDEV, Group et al. 2007].

## 2.3 Especificação OPERA para o Modelo de Camada Física

Para combater os efeitos nocivos à comunicação BPL, o modelo de camada física especificado pelo padrão OPERA [EDEV, Group et al. 2007] sugere a técnica de multiplexação OFDM, por sua habilidade de adaptação do canal BPL diante da seletividade em frequência, eficiência espectral, robustez ao ruído impulsivo e modulação adaptativa nas suas portadoras. Além disso, adotam-se robustos esquemas de codificação de canal de fácil integração à multiplexação e capazes de combater ruídos de variadas naturezas impostas pelo meio de propagação.

A especificação OPERA descreve uma camada física capaz de atingir taxas supe-



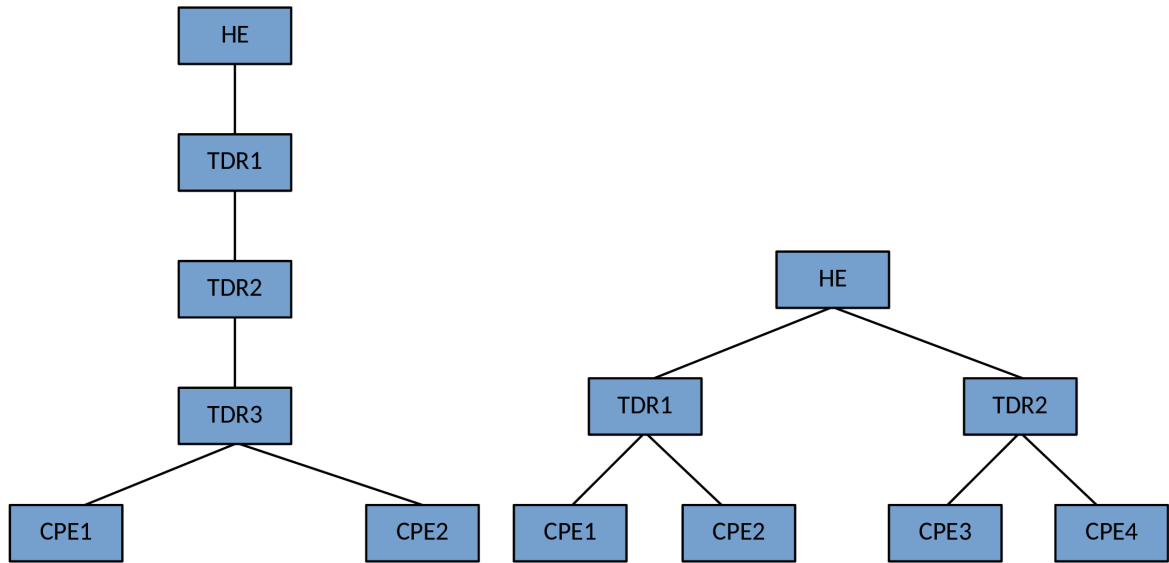


Figura 3 – Topologia em árvore de uma rede de acesso BPL.

riores a 200 Mbps, um controle de acesso mestre-escravo otimizada para o ambiente de acesso BPL, mecanismos de *QoS* disponíveis para oferecer suporte a garantias de largura de banda e latência e procedimentos de segurança usados para fornecer a privacidade dos dados [EDEV, Group et al. 2007].

A especificação OPERA também prevê três tipos de largura de banda para funcionamento do sistema, quais sejam, o tipo I com 30 MHz de largura de banda, o tipo II utilizando 20 MHz e o tipo III com 10 MHz. A banda de 30 MHz compreende as frequências entre aproximadamente 2 e 32 MHz, sendo que as bandas do tipo II e III são subdivisões desta. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros OFDM empregados nestas três larguras de banda [EDEV, Group et al. 2007].

Tabela 1 – Parâmetros OFDM especificados no padrão OPERA.

Parâmetro	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Quantidade de subportadoras $N_S$	1536	1536	1536
Quantidade de amostras da (I)FFT $N_{FFT}$	2048	2048	2048
Quantidade de amostras do prefixo cíclico $N_{CP}$	800	532	268
Duração do prefixo cíclico $T_{CP}$ em $\mu s$	20	19,95	20,1
Amostras do símbolo OFDM $N_{SYM}$	2848	2580	2316
Duração do símbolo OFDM $T_{SYM}$ em $\mu s$	71,2	96,75	173,7



## 3 Metaheurísticas: Aspectos Gerais

Uma classe de problemas que desperta interesse por parte dos pesquisadores são problemas de Otimização Combinatória NP-Completo. Tais problemas não apresentam soluções satisfatórias em algoritmos tradicionais devido a sua alta complexidade, então adota-se um artifício para solucioná-los, que são as heurísticas. As heurísticas são limitadas e quando gulosas tendem a fornecer a mesma solução se iniciadas do mesmo ponto de partida, e por vezes não atingem a solução ótima para esses problemas.

As metaheurísticas ou heurísticas genéricas utilizam-se de estratégias de mais alto nível a fim de criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções do problema. Isto é, as metaheurísticas quando aplicadas a um problema de otimização tem como objetivo gerar espaços de busca em vizinhanças que evitem parada prematura da solução em mínimos locais buscando se aproximar de uma otimização global do sistema. Nos últimos anos muitas técnicas enquadradas como metaheurísticas, que aspiram encontrar um ótimo global tem sido propostas. Algumas dessas metaheurísticas mais amplamente divulgadas são Busca Tabu, *Variable Neighborhood Search* (VNS), Algoritmos genéticos, GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), colônia de formiga, PSO, entre outros.

A metodologia deste trabalho é proposta com o auxílio de 2 metaheurísticas utilizadas para buscar boas soluções no problema de alocação de equipamentos BPL, que são: Algoritmos genéticos e PSO (*Particle Swarm Optimization*).

### 3.1 Algoritmos Genéticos

A metaheurística conhecida por Algoritmo Genético (AG), se insere nos mecanismos de evolução dos seres vivos, na teoria da evolução de Charles Darwin, imita o princípio da seleção natural na sobrevivência dos indivíduos mais adaptados, preservação da informação genética melhor adaptada. Proposta por John Holland em 1975 [Holland 1975], mas difundido por Goldberg em 1989 [Goldberg e Holland 1988] o AG percorre o espaço de busca do problema avaliando a função *fitness* ao final de cada iteração. A ideia que envolve os AG's é a de simular processos naturais de sobrevivência e reprodução dos seres vivos que são essenciais em sua evolução. Na natureza, os indivíduos de uma mesma população competem entre si, buscando principalmente a sobrevivência, e, quanto melhor um indivíduo se adaptar ao meio em que vive, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes.

Os AG's trabalham com representação binária (zero-um) para gerar solução, ou

componentes de solução, de um determinado problema. Esta representação tem se mostrado eficiente para solução de diversos problemas. De acordo com o número de restrições do problema essa representação pode ser alterada e um cromossomo pode ser representado por um vetor de números inteiros. Portanto uma boa avaliação das características do problema sempre se faz necessária para verificar se a representação está corretamente associada ao problema abordado e aos seus domínios.

A solução inicial do problema parte da geração de uma população inicial de cromossomos, que em muitos problemas se faz de modo aleatório. Assim, com a população gerada é realizada a avaliação dos cromossomos e determina-se seu nível de aptidão para sobrevivência. A partir disso são aplicados operadores de modo a modificar esses cromossomos na tentativa de torná-los cada vez mais aptos. Os operadores genéticos utilizados são: seleção, cruzamento e mutação; que geram nova população a partir de uma população já existente e serão abordados nas seções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3.

Para implementação de um algoritmo genético são necessários um conjunto de parâmetros e critérios a serem definidos de acordo com o problema abordado, tais como:

- O tamanho da população;
- A seleção dos cromossomos reprodutores;
- O critério de sobrevivência dos cromossomos;
- O critério de parada.

Um algoritmo genético simples possui uma estrutura conforme a apresentada na Figura 4. Durante uma iteração  $t$ , o algoritmo genético mantém uma população de soluções candidatas (cromossomos),  $P(t) = x_1^t, \dots, x_n^t$ . Cada solução  $x_i^t$  é avaliada e mede-se sua aptidão (*fitness*), ou seja, a qualidade da solução do problema representada por este cromossomo. Então, uma nova população (iteração  $t + 1$ ) é formada pela seleção dos indivíduos (cromossomos) mais aptos. Alguns membros desta nova população serão selecionados para fazer parte da chamada ‘população intermediária’, a qual sofrerá alterações devido à ação de operadores genéticos, enquanto outros permanecerão intactos [Mitchell 1998].

### 3.1.1 Seleção

A seleção é a operação genética que escolhe os cromossomos dos indivíduos tido como mais aptos de uma população para formar a próxima geração. A seleção compara a função de aptidão dos indivíduos de uma população e decide quais indivíduos seguiram para as próximas gerações. Os indivíduos mais fortes têm maior probabilidade de avançarem, enquanto os indivíduos mais fracos avançam com menor probabilidade para as próximas

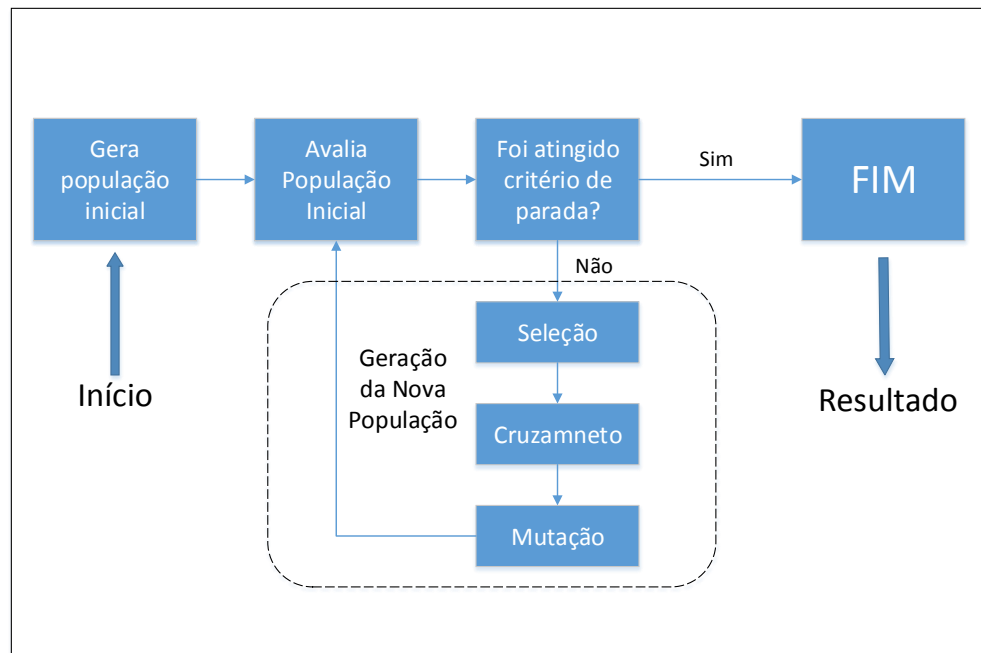


Figura 4 – Fluxograma de processamento do algoritmo genético.

gerações. Isto é quanto maior a função aptidão maior a chance do indivíduo ser selecionado [Coley 1999].

Existem dois métodos principais de seleção, a seleção proporcional e a seleção por torneio.

### Seleção Proporcional

Admita uma população de  $n$  indivíduos, a seleção proporcional é a probabilidade de um indivíduo avançar para próxima geração, e é definida pela sua função de aptidão. A fim de visualizar este método de seleção considere uma roda de roleta. Cada indivíduo da população ocupa um campo da roleta de tamanho proporcional à sua função de aptidão. Quanto mais apto o indivíduo for, maior o campo da roda de roleta destinado a ele, logo maior a probabilidade de escolha deste indivíduo. A roleta é girada  $n$  vezes.

### Seleção por torneio

Na seleção por torneio o indivíduo mais apto de um grupo  $z$  da população é escolhido para avançar para as próximas gerações. Esse processo é repetido  $n$  vezes. O grupo  $z$  é chamado de torneio e o vencedor desse torneio é o indivíduo escolhido. A seleção dos mais aptos pode ser aumentada, com o aumento de indivíduos no grupo de torneio. Normalmente um vencedor de um grande torneio tem uma função de aptidão maior que o

vencedor de um torneio pequeno.

### 3.1.2 Cruzamento

O cruzamento é o operador genético que produz novo material genético pela troca de material genético entre os indivíduos da população, assim surgem novos indivíduos. Dois indivíduos são escolhidos e cruzados e os filhos resultantes substituem os pais na nova população.

A operação de cruzamento ocorre da seguinte forma: um número aleatório entre 0 e 1 é gerado. Se esse número é menor do que a probabilidade de cruzamento, então dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente, seus pares de cromossomos são emparelhados e separados por um ponto de cruzamento. O ponto de cruzamento determina como o material genético dos novos indivíduos deverá ser composto. Para cada par de indivíduos, o ponto de corte do cruzamento é determinado aleatoriamente e sua representação determina como o operador cruzamento é aplicado para os indivíduos, como ilustrado na Figura 5 [Mitchell 1998].

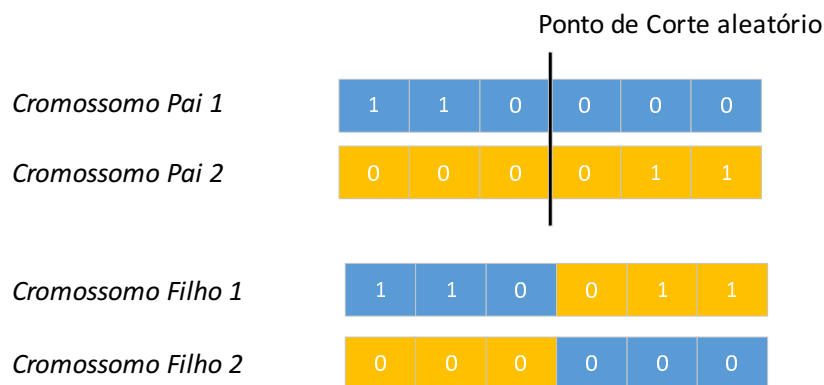


Figura 5 – Exemplo da operação de cruzamento em um ponto de corte

### 3.1.3 Mutação

O processo de mutação provoca uma variação aleatória sobre o gene de um indivíduo. Uma mutação é realizada com uma probabilidade, também fixada antes do processo de otimização. Para cada indivíduo um número aleatório entre 0 e 1 é gerado e comparado com a probabilidade de mutação. Se o número aleatório é menor do que a probabilidade de mutação, o gene é alterado, como representado na Figura 6, [Mitchell 1998].

## 3.2 *New Binary Particle Swarm Optimization* - NBPSO

Na natureza várias espécies se beneficiam da vida compartilhada em grupos sociais, pois essa sociabilidade aumenta a probabilidade de acasalamento, facilita caça, dificulta



Figura 6 – Exemplo da Operação de mutação

ataques de predadores, permite divisão de trabalho, entre outros. Baseados nessas vantagens da inteligência da coletividade que muitas espécies possuem, pesquisadores desenvolveram ferramentas computacionais para solução de problemas complexos, surgindo assim o termo Inteligência de Enxame [White e Pagurek 1998].

No ano de 1995 Kennedy e Eberhart em seu artigo *A New Optimizer Using Particle Swarm Theory* [Kennedy e Eberhart 1995], introduziram o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas, o PSO (*Particle Swarm Optimization*). O PSO originou-se de uma observação de comportamento de sistemas sociais da revoada de pássaros, referindo-se a sistemas de inteligência artificial onde o comportamento coletivo dos indivíduos gera soluções simples e coerentes.

A técnica PSO realiza pesquisas usando uma população de partículas, cada partícula correspondendo a um indivíduo e se comporta como um pássaro do bando a procura de alimento ou local para o ninho. Cada partícula tenta encontrar a melhor posição (estado) com o tempo num espaço multidimensional e ajusta a sua posição à luz da sua própria experiência e as experiências de seus vizinhos (experiência do bando), incluindo a velocidade e a posição atual e a melhor posição anterior vivida por si mesma e seus vizinhos.

O PSO originalmente foi aplicado em problemas contínuos. Entretanto muitos problemas de otimização estão definidos em espaços discretos, surgindo assim o BPSO (*Binary Particle Swarm Optimization*). Em 2008 Nezamabadi et al propõe o NBPSO (*New Binary Particle Swarm Optimization*) visando melhorar problemas de convergência encontrados no BPSO [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008].

### 3.2.1 O Algoritmo *Particle Swarm Optimization* -PSO Padrão

O algoritmo PSO é motivado por padrões comportamentais sociais. Esta abordagem de otimização atualiza a população de indivíduos aplicando um operador de acordo com as informações de aptidão obtidas do ambiente para que os indivíduos da população possam se mover em direção a melhores áreas de solução. O PSO utiliza uma população de partículas como os indivíduos. Cada partícula é uma solução candidata do problema.

Assim, as partículas vão mudando de posição no espaço de busca seguindo as melhores posições encontradas até o momento pelas partículas do bando. Como em todo problema de otimização baseada em populações, ao final da execução a melhor ou as melhores soluções, de acordo com uma função objetivo, são apresentadas como resultado [Banks, Vincent e Anyakoha 2007], [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008] e [Rostami-Shahrbabak e Nezamabadi-pour 2006]. A tabela 2 sintetiza os principais termos utilizados nesta metaheurística.

Tabela 2 – Termos utilizados no PSO

Termo	Significado
Partícula	Pássaro
Enxame	Bando de pássaros
Espaço de busca	Área sobrevoada pelos pássaros
Posição	Localização de cada pássaro
Solução Ótima	Localização do pássaro onde encontrou o ninho ou o alimento
Fitness	Função de avaliação
$p\_best$	Melhor posição conhecida pelo pássaro (Experiência Individual)
$g\_best$	Melhor posição conhecida pelo exame (Experiência Coletiva)

Cada partícula (indivíduo) conhece o melhor valor de posição até agora encontrada por ela mesma (chamada como melhor pessoal ou  $p\_best$  para a  $i$ -ésima partícula). A informação corresponde a experiências pessoais de cada agente. Além disso, cada partícula conhece o melhor valor até agora encontrado no grupo (conhecido como melhor global ou  $g\_best$ ). Sendo assim cada partícula tenta mudar sua posição utilizando as seguintes informações [Banks, Vincent e Anyakoha 2007]:

- Distância entre posição atual e a  $p\_best$ ;
- Distância entre posição atual e a  $g\_best$ .

As partículas atualizam suas posições no espaço  $d$  dimensional conforme as equações (1) e (2) descritas abaixo:

$$v_{id}(t+1) = w \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot rand_1() (p\_best - x_{id}(t)) + c_2 \cdot rand_2() (g\_best - x_{id}(t)), \quad (1)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1), \quad (2)$$



onde  $rand_1()$  e  $rand_2()$  são funções aleatórias que podem assumir os valores de  $[0,1]$ . O coeficiente  $c_1$  é chamado de fator de individualidade que influencia na atração que a partícula tem em direção à melhor posição já encontrada por ela mesma e o coeficiente  $c_2$  é o fator de sociabilidade que é o quanto influencia na atração que a partícula tem em direção à melhor posição já encontrada por qualquer partícula vizinha à ela. O coeficiente  $w$  é o fator de inércia, usado para controlar a influência dos valores anteriores da velocidade no cálculo da velocidade atual [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008] e [Rostami-Shahrbabak e Nezamabadi-pour 2006].

Essa mudança de posição é representada pelo conceito de velocidade. A medida que a partícula muda sua posição, a mesma compara o valor da aptidão da sua posição atual com sua melhor forma física, ou seja, o melhor valor que já alcançou até o momento. Cada partícula possui uma posição  $x_i$  e a taxa com que essa posição varia é a sua velocidade  $v_i$ , isto é, a cada iteração a velocidade de cada partícula é ajustada. O cálculo da velocidade é baseado na melhor posição encontrada pela vizinhança da partícula e pela melhor posição encontrada pela própria partícula.

O processamento do algoritmo PSO é ilustrado na Figura 7. Onde cada partícula, numa dada iteração tem uma posição no espaço e uma velocidade de deslocamento neste espaço. Possui também uma memória que guarda os valores de  $p\_best$ , que é a melhor posição alcançada pela partícula e de  $g\_best$ , que é a melhor posição encontrada pelo bando de partículas. A posição de cada partícula representa uma solução potencial para o problema. O objetivo do algoritmo é movimentar as partículas a fim encontrar posições de soluções mais aptas. Esta qualidade (aptidão) das soluções é avaliada pela função de avaliação *fitness* do problema que é responsável por qualificar a posição de uma partícula.

### 3.2.2 O Algoritmo *Binary Particle Swarm Optimization* - BPSO

Para os casos de problemas de otimização discretos Kennedy e Eberhart desenvolveram o algoritmo BPSO [Kennedy e Eberhart 1997]. O espaço de busca do algoritmo BPSO é um hipercubo em cujos cantos cada partícula pode mover-se, mudando seus bits. A velocidade que acontece esse movimento é definida em termos de mudanças de probabilidade, a qual terá uma certa probabilidade para cada estado. Assim, uma partícula se move num espaço de “0” e “1” em cada dimensão, onde cada  $v_i$  representa a probabilidade de bit  $x_i$  tomar o valor “1”. Tanto o PSO padrão quanto o BPSO são implementados através de modelos globais e locais que direcionam as partículas para uma melhor solução [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008], [Rostami-Shahrbabak e Nezamabadi-pour 2006].

No PSO padrão, a atualização da partícula dá-se pela em função das posições individuais ( $p\_best$ ) e coletivas ( $g\_best$ ) alcançadas e pela velocidade adquirida, conforme equações (1) e (2). No BPSO a velocidade de cada partícula  $v_{id}$  é traduzida como a

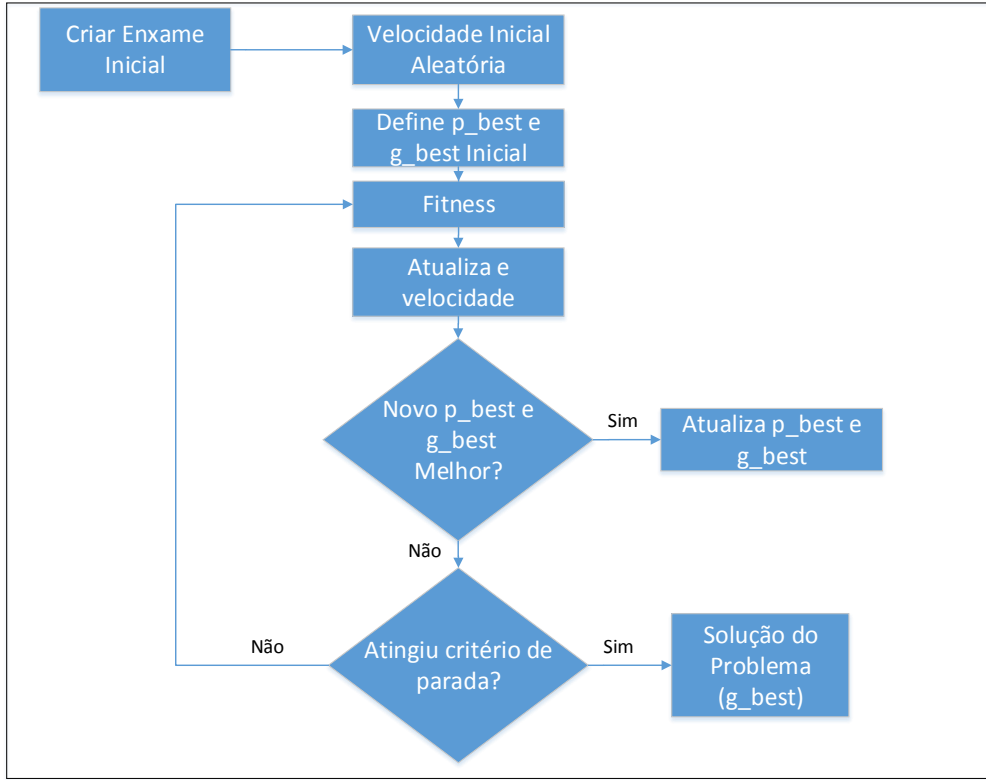


Figura 7 – Fluxograma de Processamento do Algoritmo PSO

probabilidade dos bits  $x_{id}$  tomarem o valor “1”. Com esta definição,  $x_{id}$  pode assumir valores inteiros entre  $\{0,1\}$  e  $v_{id}$  assume valores dentro do intervalo  $[0,0;1,0]$ . Assim a equação (3) define a função que ordena a logística da velocidade  $v_{id}$ , e as novas posições atualizadas de acordo com a equação (4), conforme [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008]

$$S(v_{id}) = \text{Sigmoide}(v_{id}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}}}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } rand() < S(v_{id}(t+1)) \text{ faça } x_{id}(t+1) &= 1 \\ \text{senão } x_{id}(t+1) &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

onde  $S(v_{id})$  é a transformação sigmoide limitante e  $rand()$  é um número aleatório com da distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$ .

### 3.2.3 O Algoritmo *New Binary Particle Swarm Optimization* - NBPSO

O algoritmo BPSO apresentava alguns problemas de convergência em relação ao PSO padrão. O primeiro deles é em relação à probabilidade. O aumento do valor da velocidade na direção positiva causa maior probabilidade (probabilidade de 1) para a posição da partícula, e na direção negativa provoca a probabilidade de zero. Além disso quando no PSO padrão a velocidade da partícula vai para zero, quer dizer que a partícula atingiu a melhor posição naquela dimensão. No BPSO essa posição pode ser mudada com a probabilidade de 0,5 e  $x_i$  pode assumir valores de “0” ou “1”. Outra desvantagem está associada a atualização da posição. A atualização da posição é realizada sem considerar a posição anterior, com isso a medida que o algoritmo vai avançando a solução pode cair em ótimos locais e ficarem presas neles. Isso faz com que o algoritmo não convirja bem [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008], [Rostami-Shahrbabak e Nezamabadi-pour 2006].

O NBPSO surge no contexto de superar as desvantagens do algoritmo BPSO fazendo com que não haja diferença entre o valor das velocidades nas direções positiva e negativa.

Com o intuito de minimizar as desvantagens do BPSO, apresenta-se no NBPSO uma nova função sigmoide, que não faz diferença entre os valores positivos e negativos da velocidade, e é dada pela equação (5). Logo, para atualização das velocidades, compara-se a nova função sigmoide com o valor aleatório obtido como descreve as equações (5) e (6) abaixo: [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008]

$$S'(v_{id}) = 2 \cdot |Sigmoid(v_{id} - 0.5)|, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } rand() < S'(v_{id}(t+1)) \quad \text{faça } x_{id}(t+1) &= troca(x_{id}(t)) \\ \text{senão } x_{id}(t+1) &= x_{id}(t). \end{aligned} \quad (6)$$



## 4 A Metodologia Proposta para Alocação de Modems BPL

O planejamento e a implementação de uma rede de comunicação PLC requer avaliação de critérios como taxa de transmissão, alcance da rede, latência, quantidade de equipamentos, entre outros. Pesquisas anteriores como as realizadas em [Castor 2016] descrevem experimentos realizados em um cenário real, cujo principal resultado foi a elaboração de uma metodologia de projeto e implantação de comunicação de dados via rede elétrica de média tensão. A avaliação de desempenho realizada a nível de camada física permitiu propor a metodologia de projeto ilustrada na Figura 8 [Castor et al. 2016].

A metodologia proposta neste estudo tem como objetivo complementar o trabalho iniciado por Castor [Castor 2016]. O bloco em que insere-se a metodologia deste trabalho está em destaque na Figura 8, que sugere a alocação física de equipamentos PLC, mais especificamente repetidoras TDR's, considerando-se aspectos da camada física da rede elétrica de MT. Assim, aborda-se neste Capítulo aspectos relacionados à construção de uma metodologia para alocação resiliente de equipamentos BPL que utilizam a rede elétrica como canal de comunicação de dados, baseado na aplicação das metaheurísticas apresentadas no Capítulo anterior, com o objetivo de minimizar a quantidade de repetidores TDR's. Os algoritmos propostos buscam soluções que levam em consideração características da rede elétrica tais como reflexões destrutivas do sinal transmitido e reconfigurações da rede causadas por alterações em sua topologia.

As metaheurísticas são utilizadas como métodos de busca capazes de construir soluções de boa qualidade durante processo de otimização. A metodologia proposta utiliza duas metaheurísticas como forma de promover alocação estratégica de repetidores PLC em sistemas de comunicação de dados sobre uma rede MT, considerando critérios tais como distância entre os equipamentos PLC, reconfiguração da rede, ramificações que podem influenciar de modo destrutivo a comunicação de dados e perda de um repetidor sem qualquer prejuízo à comunicação PLC.

### 4.1 Descrição da Rede Elétrica MT usada para Levantamento dos Parâmetros Físicos do Modelo de Alocação

A Figura 9 ilustra a rede de média tensão utilizada para extrair os parâmetros físicos usados na metodologia de alocação de equipamento BPL em uma rede PLC. Trata-se de uma rede utilizada para experimentos relativos a aplicação do conceito de *Smart*

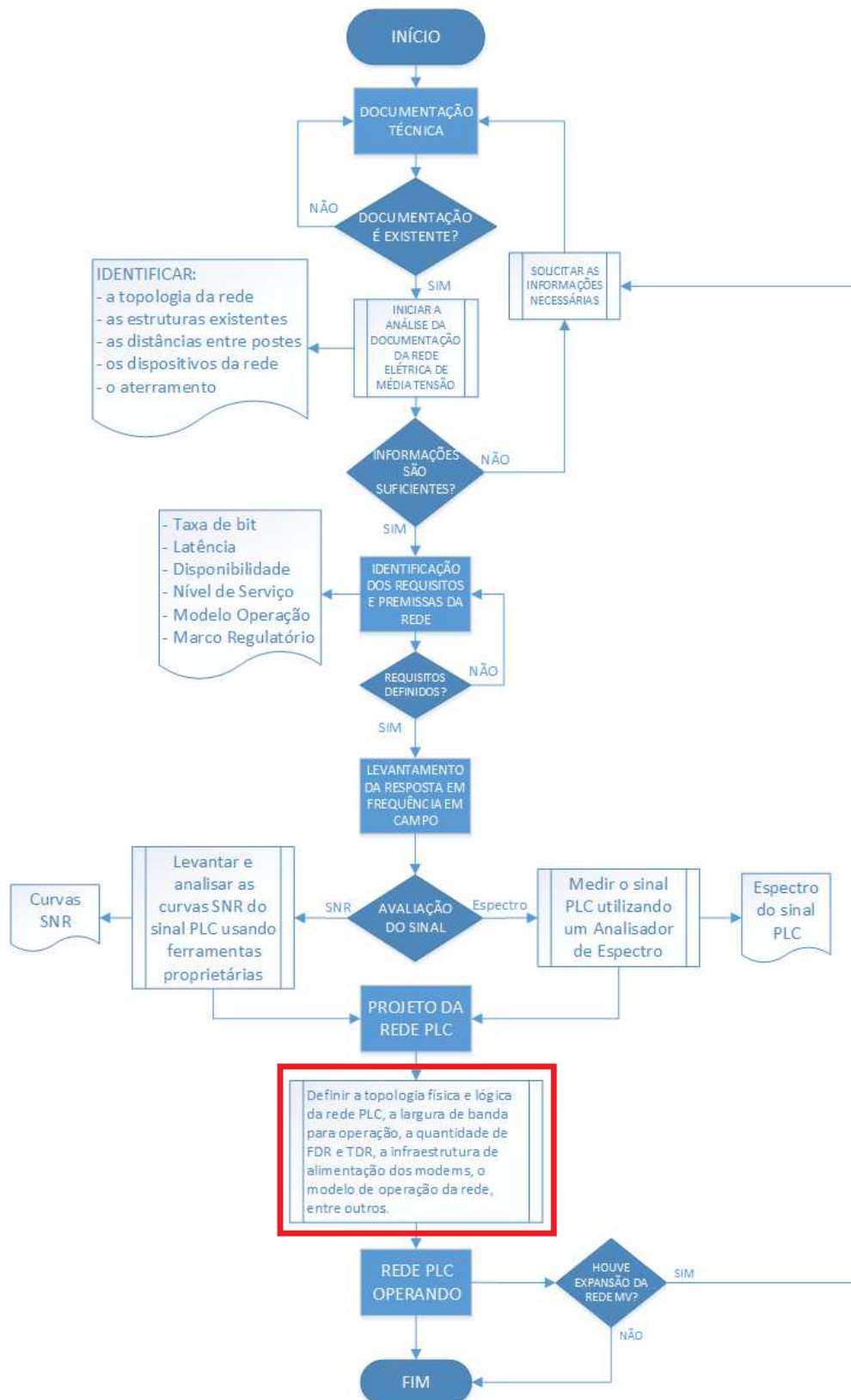


Figura 8 – Fluxograma da Metodologia de implementação de redes de acesso utilizando a tecnologia PLC sobre redes elétricas MT. Em destaque, o bloco objeto deste trabalho. Fonte: [Castor et al. 2016].

*Grids* em zonas rurais. Com uma extensão de aproximadamente 1,63 km e composta de 7 equipamentos BPL, a rede alimenta poços produtores de petróleo *onshore* dotados de sistemas de automação e de dispositivos eletrônicos para vigilância patrimonial.

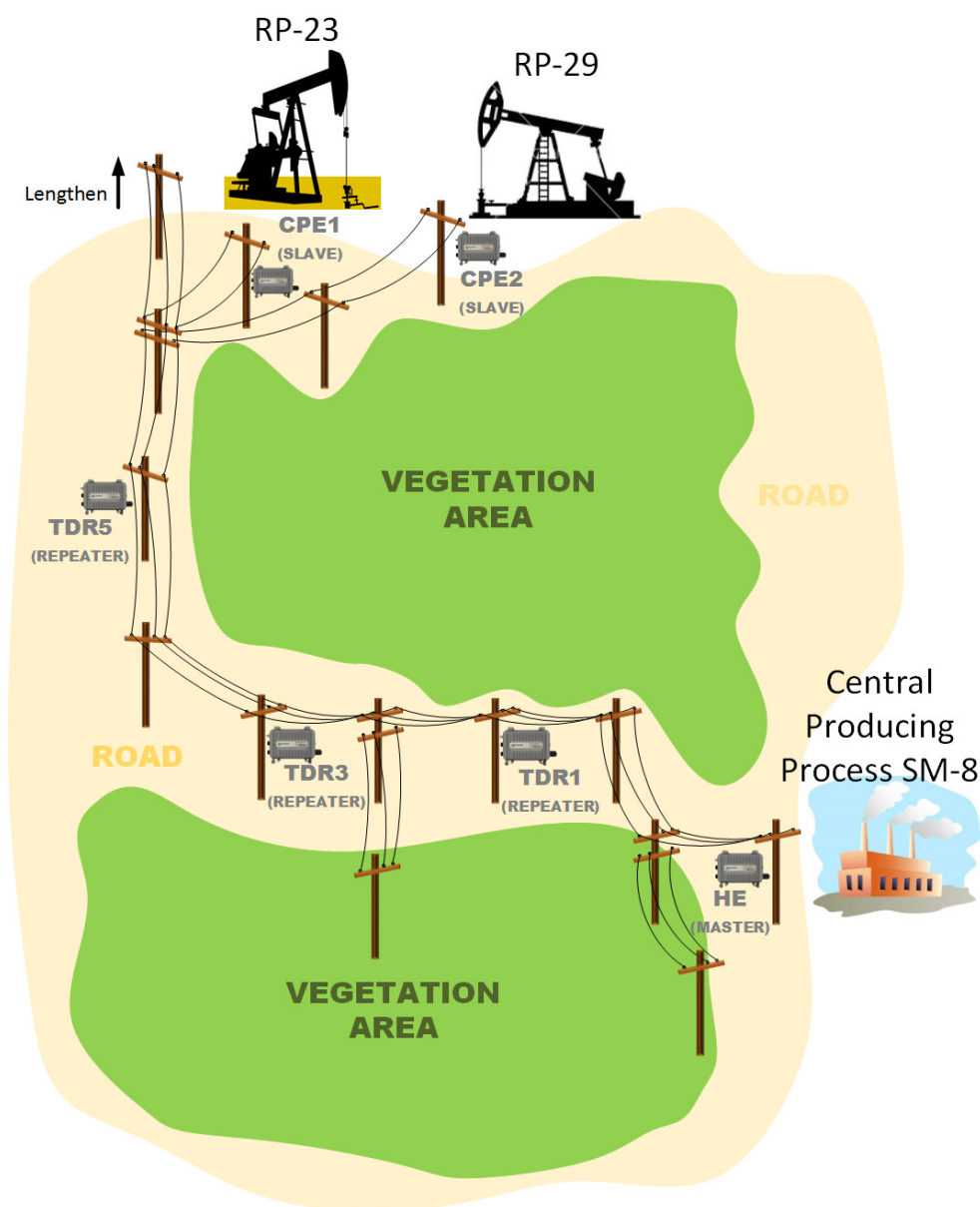


Figura 9 – Rede MT usada para extrair afirmações importantes ao modelo de alocação de equipamentos utilizada para experimentos relativos à aplicação do conceito de *Smart Grids* em poços de extração de petróleo *onshore*. Fonte: [Castor et al. 2016].

A estação coletora denominada de SM8 é o local onde ocorre a concentração do tráfego de automação e de vídeo advindos dos poços produtores de petróleo. Através desta estação é possível realizar remotamente a supervisão e controle do sistema de automação destes poços, além do monitoramento de imagens. Um servidor de aplicações foi instalado e conectado à rede BPL para este fim.

Um equipamento mestre HE foi instalado junto a estação SM8 com a função de designar recursos para todos os nós da célula BPL através do uso de *token* e de acordo com o QoS marcado nos fluxos de dados da rede. Para cada poço de petróleo foi instalado um equipamento escravo CPE e ao longo do trajeto foram alocados repetidores TDR. A topologia da rede projetada para os testes em campo é ilustrada na Figura 10.

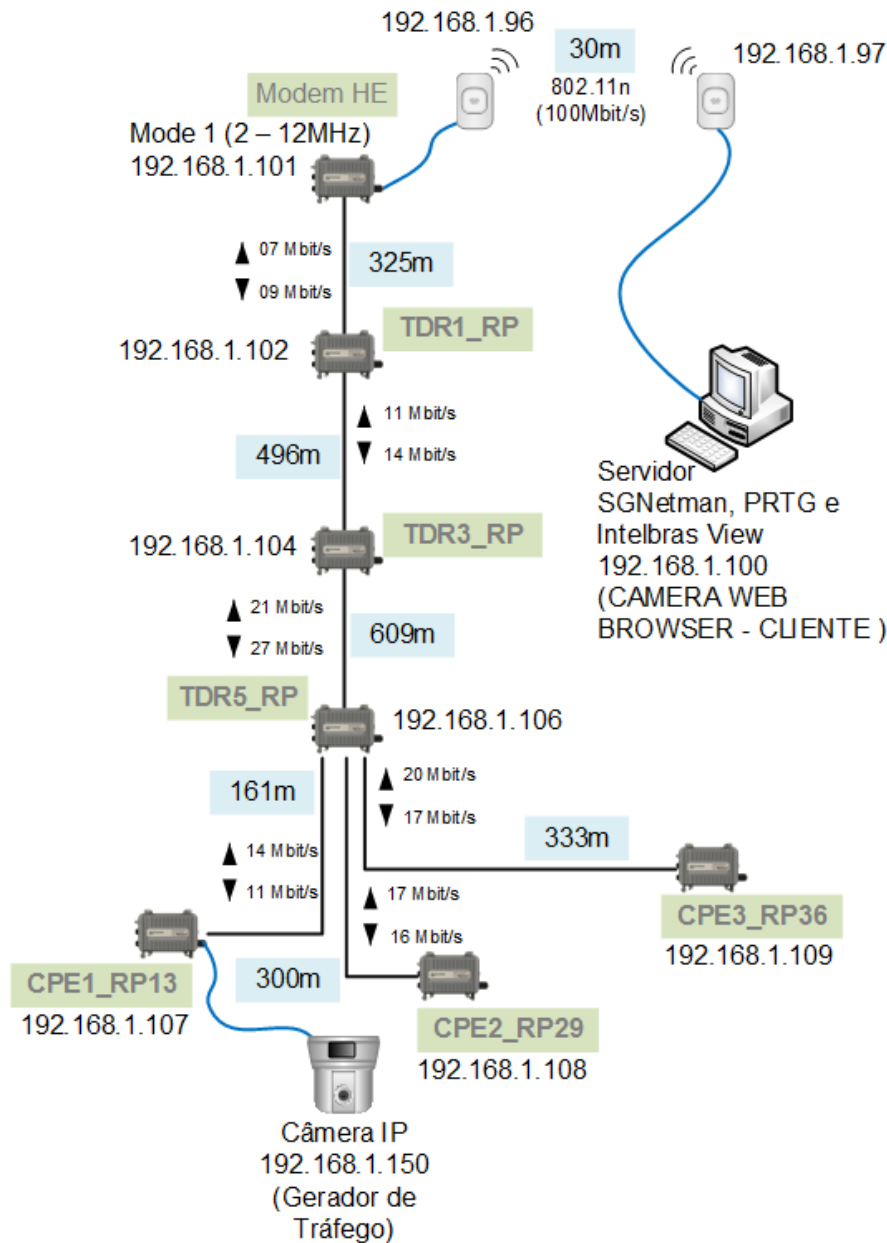


Figura 10 – Topologia de testes para experimentos relativos à aplicação do conceito de redes inteligentes *Smart Grids* em poços de extração de petróleo *onshore*.

Observa-se que além do HE instalado em SM8 e dos repetidores ao longo do caminho principal, para cada poço produtor de petróleo foi instalado um CPE. No poço RP-13, no CPE1, foi instalado uma câmera IP (*Internet Protocol*) de alta resolução para geração de tráfego, enquanto os CPE's dos demais poços RP-29 e RP-36 permaneceram livres para



conexão de outros serviços, apesar de gerarem tráfego apenas em momentos de averiguação do estado da rede comunicando-se com o HE.

Convém ressaltar que em trabalhos anteriores estabeleceu-se uma distância média de 500 m entre os referidos repetidores respeitando-se as especificações do fabricante com as devidas variações provenientes de observações técnicas verificadas em campo [CORINEX 2014], [Castor et al. 2014], [Castor et al. 2016]. Destas observações destacam-se as averiguações de que derivações menores de cerca de 10 % em relação ao trecho principal, introduzem interferências destrutivas nos sinais propagados em um perfil de transmissão multipercurso, enquanto as 1,5 vezes maiores que o comprimento do trecho principal apresentam influências quase insignificantes. No entanto um trecho de 609 m entre dois repetidores foi propositalmente projetado para a avaliação dos efeitos de atenuação na taxa de transferência no referido enlace.

Observa-se ainda que a menor taxa de transferência medida (7 Mbps) ocorreu no trecho onde existe uma ramificação destrutiva. Curiosamente, a taxa máxima de 27 Mbps em *downstream*) ocorreu no trecho de 609 m, o que ilustra um relaxamento na distância entre repetidores sugerida pelo fabricante. Mesmo sendo abaixo daquele previsto pelo padrão, é mais do que suficiente para o estabelecimento da rede MT como meio de transporte dos serviços testados em um contexto de rede inteligente.

Os testes em campo foram realizados com um modem do fabricante Corinex. Trata-se de um *Gateway* HD/LV de alta densidade, para uso em redes de baixa tensão (mas aplicável em redes de média tensão) e que provê taxas de transmissão físicas máximas que alcançam os 200 Mbps em uma largura de banda de aproximadamente 30 MHz e distâncias que chegam aos 500 m [CORINEX 2014].

## 4.2 Simulação e Avaliação do Desempenho do Sistema BPL em Canais com Respostas Impulsivas Medidas em Campo

O efeito do canal BPL medido nos diversos trechos da rede MT mostrada na Figura 9 foi analisado em estudos anteriores perante avaliação numérica de desempenho BER (*Bit Error Rate*) versus SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) dos sistemas OFDM conforme diagrama da Figura 11 e parametrizados segundo algumas especificações do padrão OPERA. Para tal, foram simulados transmissões de 3000 símbolos OFDM por frame, cada um contendo  $N_S = 1536$  subportadoras de dados mapeados em QPSK e 8-PSK, pelos canais BPL com ruído aditivo Gaussiano AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) [Oliveira et al. 2016].

Conforme esperado, os resultados dos testes realizados demonstraram que as taxas de transferências variam de acordo com o trecho da rede física MT. Constatou-se assim que, a taxa de transmissão medida no trecho HE para a TDR1 apresentou menor valor

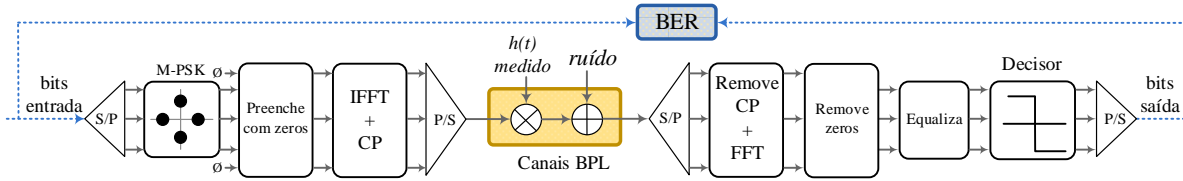


Figura 11 – Diagrama de blocos da modulação OFDM em banda base usada para avaliação dos efeitos de camada física do sistema BPL experimentado. S/P: Conversão serial para paralelo; PSK: *Phase-Shift Keying*; (I)FFT: *(Inverse) fast Fourier transform*; CP: *Cyclic prefix*, P/S: Conversão paralelo para serial.

quando comparado aos demais devido às interferências destrutivas causadas por reflexões do sinal causados pela existência de uma derivação relativamente pequena em relação ao trecho principal de comunicação.

#### 4.2.1 Levantamento das Respostas Impulsivas

Os equipamentos BPL instalados na rede possuem a funcionalidade de fornecer a medida da relação entre a potência do sinal e potência de ruído SNR em cada subportadora ao longo da banda configurada para comunicação, medida essa que evidencia a citada seletividade em frequência, tendo em vista a modulação adaptativa implementada nos modems.

Portanto, por denunciar um perfil de resposta em frequência do meio, a simples medição das SNR's nas subportadoras torna a implementação da rede mais eficiente, uma vez que possibilita a melhor escolha da banda de transmissão. As respostas impulsivas dos diversos trechos podem então ser obtidas a partir destas medidas, de forma a averiguar se a duração do prefixo cíclico adotado em cada trecho é de fato contemplado pelo padrão OPERA. O método de coleta e de armazenamento das SNR's foi auxiliado pela ferramenta SNMP (*Simple Network Management Protocol*), o qual forneceu como medidas em campo, os perfis de resposta em frequência ilustrados na Figura 12. As medidas foram realizadas operando-se em uma largura de banda de 10 MHz centrada em 7,96 MHz.

Observa-se pelas medidas de SNR da Figura 12 que a rede apresenta melhor comportamento nas componentes de mais alta frequência em quase todos os trechos contemplados pela comunicação HE-CPE1. Constata-se pelas respostas impulsivas da Figura 12 e obtidas das medidas de SNR, que o espalhamento por atraso multipercursos para cada trecho analisado que é de aproximadamente  $2\mu s$ , valor este muito abaixo dos  $20,1\mu s$  especificados pelo OPERA [Oliveira et al. 2016].

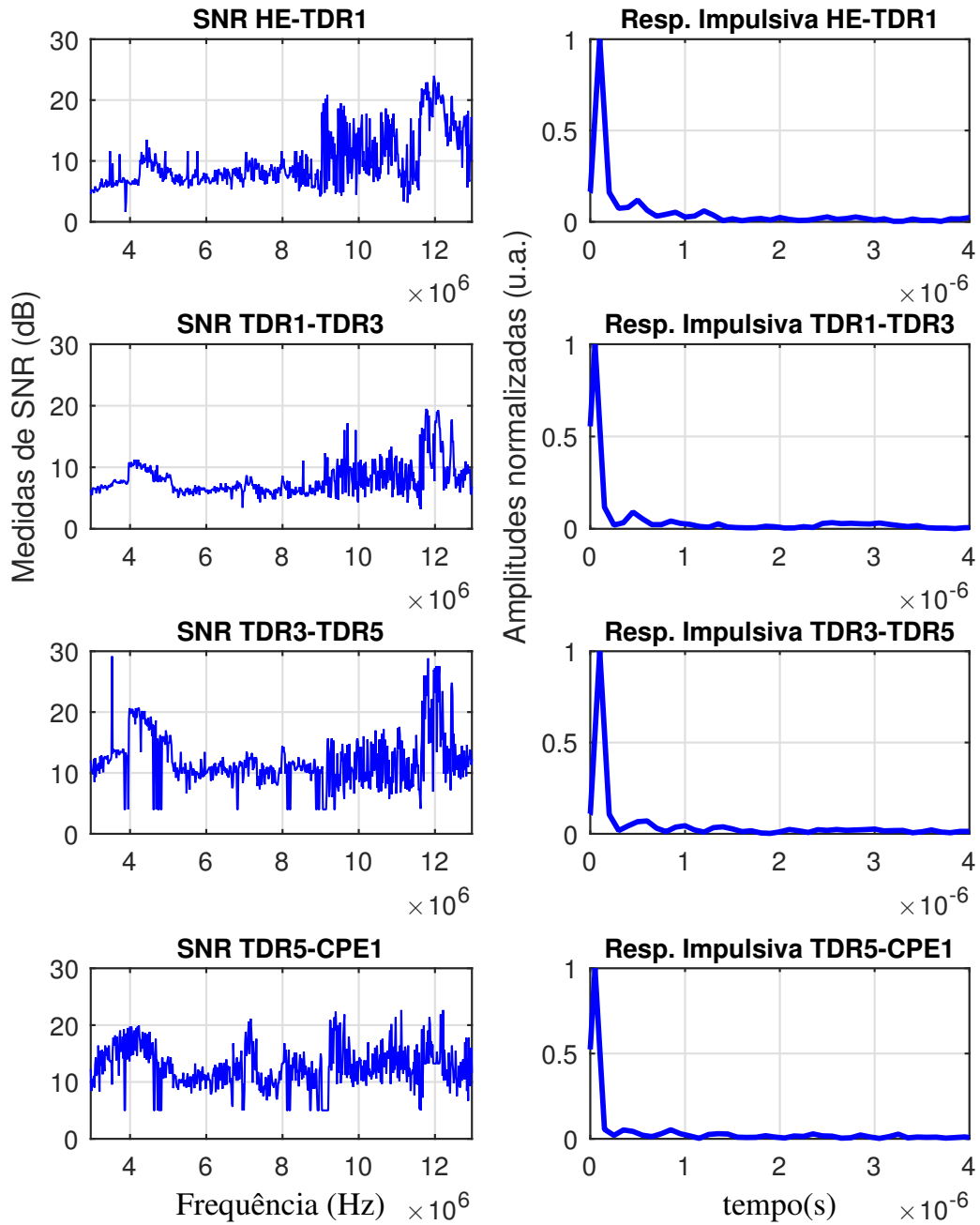


Figura 12 – Medidas de resposta impulsiva obtidas a partir do perfil das resposta em frequência dado pelas medidas de SNR nos trechos: (a) HE-TDR1, (b) TDR1-TDR3, (c) TDR3-TDR5 e (d) TDR5-CPE1.

Esta avaliação foi importante para a definição dos parâmetros do modelo OFDM básico de simulação da camada física, para servir a implementação do algoritmo de alocação ótima de equipamentos BPL.

### 4.2.2 Análise dos Desempenhos

A Figura 13 mostra a curva de desempenho BER por SNR do trecho entre o equipamento mestre HE e a primeira repetidora TDR1, considerando-se os mapeamentos QPSK e 8-PSK nas subportadoras. Este trecho é de especial interesse devido à existência de uma derivação de comprimento menor do que o do enlace principal que se estende desde o HE até o equipamento escravo CPE1 conectado à câmera geradora de tráfego. Por este fato, segundo relato do fabricante dos equipamentos, esta derivação pode ser denominada de derivação interferente.

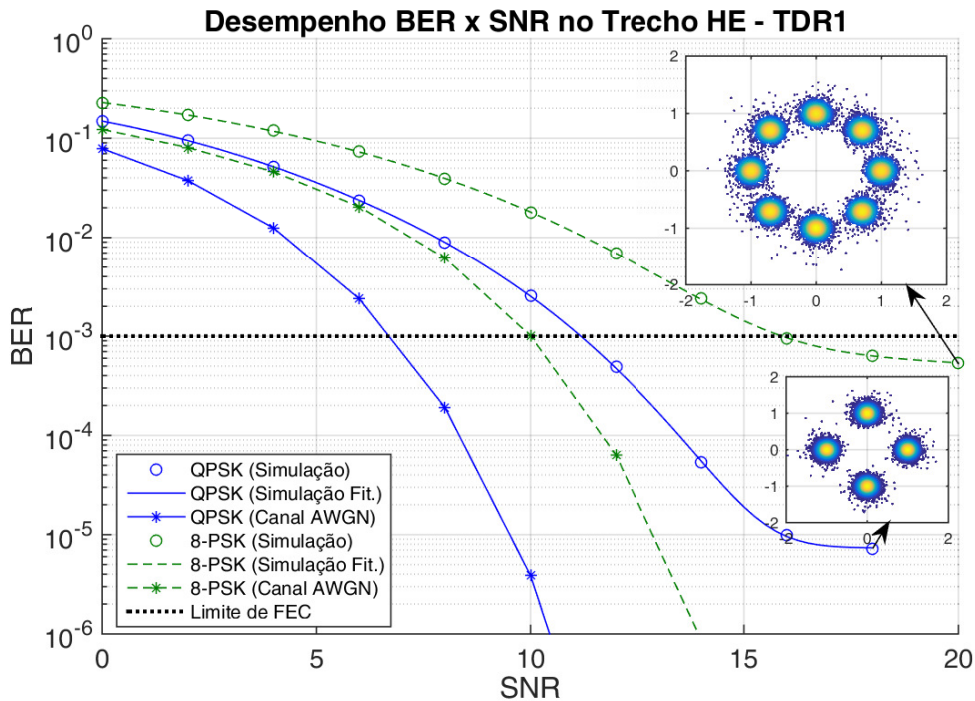


Figura 13 – Análise de desempenho do sistema OFDM com modulação 4 e 8- PSK nas subportadoras para comunicação no trecho contendo o equipamento master HE e a repetidora TDR1.

Observa-se pelas curvas da Figura 13 que no limite de FEC (*Forward Error Correction*), ou seja, para  $BER = 10^{-3}$  registram-se penalidades de aproximadamente 4 e 6 dB para as modulações QPSK e 8-PSK respectivamente, quando comparam-se os desempenhos com aqueles designados pela transmissão em canais AWGN. Ainda pelas curvas de desempenho mostradas na Figura 13 constata-se a ocorrência de um platô para valores de SNR acima de 16 dB para ambos os mapeamentos por subportadora. Isto é explicado pela existência da derivação acima supracitada, responsável pelas interferências destrutivas que caracterizam uma comunicação multipercurso entre o HE e o TDR1.

Com o auxílio das robustas técnicas de codificação de canal, especificadas pelo OPERA e implementadas nos modems usados nos experimentos, consegue-se perfeitamente corrigir tais interferências e consequentemente eliminar as dispersões ilustradas nos

diagramas de constelação mostrados no interior da Figura 13 e medidos para SNR iguais a 18 e 20 dB para QPSK e 8-PSK, respectivamente [Oliveira et al. 2016].

A avaliação da comunicação ponto-a-ponto entre os repetidores dá-se pelo fato de optar-se por espaçar os repetidores TDR3 e TDR5 em 609 m, comprimento este maior que os 400 m recomendado pelo fabricante dos modems. A Figura 14 apresenta curvas de desempenho nos trechos TDR1-TDR3 (trecho de 496 m) e TDR3-TDR5 (trecho de 609 m), bem como curvas de desempenho em um canal com ruído AWGN para as devidas comparações.

Observa-se na Figura 14 que, apesar de experimentadas enlaces acima dos comprimentos recomendados, para mapeamento QPSK nas subportadoras, o desempenho foi satisfatório em ambos os trechos. Quando comparados com o desempenho em um canal AWGN, no limite de FEC, as penalidades registradas foram de aproximadamente 4 e 4,4 dB nos trechos TDR1-TDR3 e TDR3-TDR5, respectivamente. Porém, nota-se na Figura 14 que, o platô acima referido ocorre para a modulação de 8-PSK nas subportadoras. Mesmo assim, pelo fato deste estabelecer-se em valores de taxa de erro abaixo do limite de FEC, entende-se também que a codificação de canal consegue corrigir os erros por ele ilustrados. Os valores de SNR medidos nos dois trechos de comunicação ponto-a-ponto para  $BER = 10^{-3}$  foram respectivamente, 15,2 e 14,5 dB.

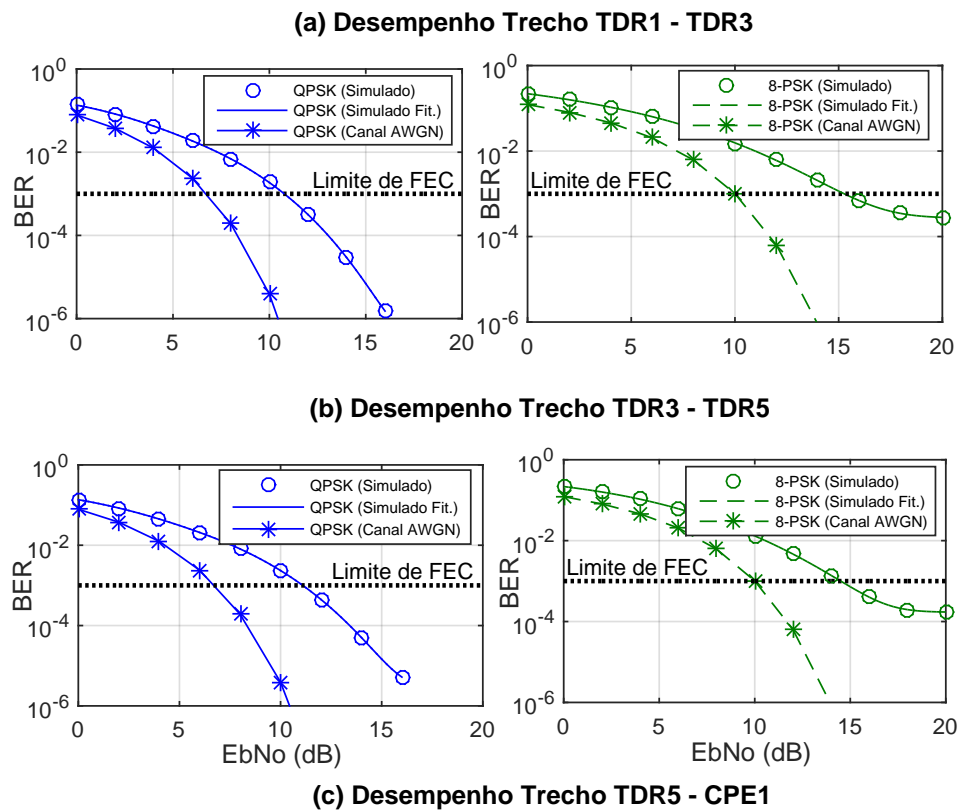


Figura 14 – Análise de desempenho do sistema OFDM (modulação 4 e 8-PSK) para comunicação BPL nos trechos: (a) TDR1 - TDR3, (b) TDR3 - TDR5.

Os resultados de simulação obtidos para mapeamento QPSK nas subportadoras mostram a viabilidade de implantação de comunicação BPL para transporte de dados de automação e vigilância de poços de extração de petróleo. Penalidades inferiores a 4 dB foram registradas em trechos de análise contendo derivações causadoras de interferências destrutivas e em enlaces de comprimento acima dos 400/500 m recomendados pelo fabricante do equipamento BPL instalado em campo.

### 4.2.3 Levantamento de Informações de Camada Física Importantes para a Metodologia de Alocação de TDRs

A rede objeto de estudos de levantamento de parâmetros de camada física vem sendo experimentada há mais de três anos para a futura implantação de uma *Smart Grid* para transporte em banda larga de dados de automação e vigilância de poços de extração de petróleo *onshore*. Os estudos têm confirmado a comunicação em um trecho com derivação interferente degrada a transmissão de sinal, diminuindo a taxa de transferência.

A descontinuidade física do meio quando atuam esquemas de proteção da rede elétrica pode causar problemas de interrupção da comunicação BPL. Alocar equipamentos a fim de garantir resiliência das redes MT de maneira autônoma mediante alterações dinâmicas da topologia de rede elétrica também é parte deste trabalho. Assim sendo, para alimentar a metodologia aqui proposta, foram feitas medidas de taxa de transmissão durante um ano. A Tabela 3 apresenta a média de taxa de transmissão nos importantes HE-TDR1 e TDR3 - TDR5.

Tabela 3 – Medida média de Taxa de transmissão durante 1 ano

Medida\Modem	Trecho HE - TDR1	Trecho TDR3 - TDR5
Distancia do Enlace (m)	325	609
Velocidade RX (Mbit/s)	82	70
Velocidade TX (Mbit/s)	56	66

Convém lembrar que o trecho TDR3-TRD5 por ser um trecho sem derivação possibilita uma maior distância entre os modems sem prejuízo a taxa de transmissão. O trecho contemplado pela comunicação HE-TDR1 possui uma ramificação de comprimento menor que 10% do tamanho do trecho principal que se estende desde o HE até o equipamento escravo CPE1 conectado à câmera geradora de tráfego. A presença desta derivação interferente faz com que a distância entre os modems HE e TDR1 seja significativamente reduzida para manutenção de uma mesma taxa de transmissão do trecho anteriormente analisado.

### 4.3 Modelagem Matemática do Problema de Alocação Analisado

A proposta deste trabalho visa resolver o problema da alocação resiliente de TDR's e as equações a seguir resumem a proposta do problema a resolver. Para isso, considere a rede elétrica de MT representada por um grafo, onde seus postes representam nós e suas linhas as arestas. Em qualquer poste pode ser alocado HE ou um TDR/FDR ou um CPE.

Partindo-se do princípio que um HE e um conjunto de CPE's já foram instalados conforme a demanda da rede, a proposta deverá alocar a mínima quantidade de repetidores respeitando-se um limite mínimo de taxa de transmissão. Assim, os dados do problema são os seguintes:

- a rede elétrica MT é formada por  $n_p$  postes;
- o número máximo de modem HE é igual a 1 (um);
- a cada 4 modems TDR's é colocado um repetidor FDR, conforme especificação do fabricante [CORINEX 2014];
- modems CPE's são alocados em postes com conexão igual a 1 (um);
- a distância e outros parâmetros dos cabos elétricos são conhecidos;
- o número máximo de TDR's ou CPE's atendidos pelo HE é igual a  $K$ .

Dessa maneira, neste trabalho adaptou-se um modelo matemático proposto em trabalhos anteriores [Pádua, Romero e Rider 2012], [Padua 2014], porém com algumas modificações a fim de obter um número mínimo de TDR's, bem como seu melhor posicionamento em função da localização dos CPE's, de tal forma que atenda todas as restrições. O modelo considera os seguintes índices:

- $i$  para localização dos equipamentos HE, TDR e FDR;
- $j$  para localização dos modems CPE.

Segundo fabricante cada equipamento HE suporta até 64 conexões diretas com modems TDR's ou CPE's [CORINEX 2014]. Assim, defina-se  $X_{ij}$  como a variável de decisão binária que indica que

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o modem TDR que está no nó } i \text{ atende o CPE ou outro TDR;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Da mesma forma, defina-se  $y_i$  como a variável de decisão binária que indica que

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se o modem TDR está no nó } i; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Seja  $\Omega_N$  o conjunto de nós em que existem modems CPE's,  $\Omega_M$  o conjunto de nós elegíveis para alocação de um modem TDR,  $\Omega_R$  o conjunto de par de nós com ramificações interferentes,  $\Omega_{SR}$  o conjunto de par de nós sem ramificações interferentes e  $c$  equivale ao custo de cada TDR alocado em um sistema conexo em que existe pelo menos um caminho e uma distância conhecida entre dois nós do sistema.

### Configuração Básica com Ramificações Interferentes

Com todas as variáveis de decisão anteriormente especificadas, o problema de localização e alocação de modems TDR's numa rede elétrica de média tensão para a tender os modems CPE's sem que haja prejuízo na taxa de transmissão assume a seguinte forma:

---

---


$$\text{Min} \quad f = \sum_{i \in \Omega_M} c \cdot y_i \quad (7)$$


---

**s.a:**

$$\sum_{i \in \Omega_M} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \Omega_N \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \Omega_N} y_i \leq M \quad (9)$$

$$d_{ij} \cdot x_{ij} \leq d_1, \quad [i, j] \in \Omega_R, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N \quad (10)$$

$$d_{ij} \cdot x_{ij} \leq d_2, \quad [i, j] \in \Omega_{SR}, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N \quad (11)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_M \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N \quad (13)$$


---

---

Nota-se que a função objetivo (7) busca minimizar o custo para instalar dispositivos TDR's na rede.

A restrição (8) significa que todos os CPE's devem ser atendidos. A restrição (9) informa que o total de modems TDR's alocados não pode ser maior que  $M$ .

A restrição (10) e a (11) descrevem os limites de distância  $d_1$  e  $d_2$  aceitáveis entre os TDR's ou entre um TDR e um CPE para ramificações interferentes e não interferentes.



E por último as restrições (12) e (13) descrevem  $x$  e  $y$  como variáveis binárias de decisão, podendo assumir os valores 0 ou 1.

### Diferentes Condições Topológicas

Os sistemas de potência frequentemente sofrem alterações em sua topologia durante sua operação e/ou manutenção, portanto, é interessante o atendimento dos requisitos de desempenho para todos cenários visando a não interrupção da comunicação quando ocorrer variações topológicas da rede. Considerando  $\Omega_{top}$  o conjunto de topologias existentes, o atendimento aos requisitos de redundância para diferentes condições topológicas da rede leva o problema a ser formulado conforme a seguir:

$$\text{Min } f = \sum_{i \in \Omega_M} c \cdot y_i \quad (14)$$

s.a:

$$\sum_{k \in \Omega_{top}} \left( \sum_{i \in \Omega_M} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \Omega_N \right) = N_{top} \quad (15)$$

$$\left( \sum_{i \in \Omega_N} y_i \right)_k \leq M, \quad \forall k \in \Omega_{top} \quad (16)$$

$$d_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \leq d_1, \quad [i, j] \in \Omega_R, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N, \quad \forall k \in \Omega_{top} \quad (17)$$

$$d_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \leq d_2, \quad [i, j] \in \Omega_{SR}, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N, \quad \forall k \in \Omega_{top} \quad (18)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_M \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N \quad (20)$$

A equação (14) busca minimizar o custo para quantidade de modems TDR no sistema para todas as topologias de interesse sabendo que  $N_{top}$  é o número de cenários topológicos.

A restrição (15) indica que todos CPE's devem ser atendidos em todas as topologias. A restrição (16) significa que o total de modem TDR alocado não pode ser maior que  $M$  considerando todas topologias atingidas.

A restrições (17) e (18) descrevem os limites de distância  $d_1$  e  $d_2$  aceitáveis entre os TDR's ou entre um TDR e um CPE para ramificações interferente e não interferente

em todas as topologias. E as restrições (19) e (20) descrevem  $x$  e  $y$  como variáveis binárias de decisão, podendo assumir os valores 0 ou 1.

### Perdas de TDR

Quando perde-se um TDR (este torna-se indisponível) tem-se como consequência a diminuição da taxa de transmissão ou até mesmo uma possível interrupção do sistema de comunicação. Para que tais situações não comprometam a qualidade da comunicação BPL, faz-se necessário considerar no planejamento do sistema de comunicação a possibilidade de perdas de TDR, tornando o sistema resiliente. Nessas condições o problema é formulado como:

---

---


$$\text{Min } f = \sum_{i \in \Omega_M} c \cdot y_i \quad (21)$$


---

**s.a.:**

$$\sum_{k \in \Omega_{tdr}} \left( \sum_{i \in \Omega_M} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \Omega_N \right) = N_{tdr} \quad (22)$$

$$\left( \sum_{i \in \Omega_N} y_i \right)_k \leq M, \quad \forall k \in \Omega_{tdr} \quad (23)$$

$$d_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \leq d_1, \quad [i, j] \in \Omega_R, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N, \quad \forall k \in \Omega_{tdr} \quad (24)$$

$$d_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \leq d_2, \quad [i, j] \in \Omega_{SR}, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N, \quad \forall k \in \Omega_{tdr} \quad (25)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_M \quad (26)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_M, \quad \forall j \in \Omega_N \quad (27)$$


---

---

A equação (21) busca minimizar o custo para quantidade de modems TDR's no sistema possibilitando que a perda de um TDR qualquer não cause nenhum prejuízo à comunicação BPL, inserindo redundância na rede. A restrição (22) traduz que todos CPE's devem ser atendidos mesmo na perda de um modem TDR. A restrição (23) indica que o total de modems TDR's alocados não pode ser maior que  $M$  considerando a perda de um TDR qualquer. A restrição (24) e a (25) descrevem os limites de distância  $d_1$  e  $d_2$  aceitável entre os TDR ou entre um TDR e um CPE para ramificações interferente e não interferente considerando a perda de um TDR. E as restrições (26) e (27) descrevem  $x$  e  $y$  como variáveis binárias de decisão, podendo assumir os valores 0 ou 1.

## 4.4 Função da Avaliação

Visando validar a adequação de cada solução candidata para o problema de alocação de repetidores TDR, a função da avaliação deve:

- i. armazenar o local do HE e criar um vetor com todos os CPE's instalados;
- ii. criar um vetor com as posições elegíveis para alocação de TDR;
- iii. criar um vetor para a penalidade caso a distância máxima permitida entre os modems seja violada e;
- iv. criar um vetor penalidade para cada CPE.

Ressalta-se que antes da sequência acima itemizada, deve-se selecionar as posições onde serão alocados o modem HE e os modems CPE's de acordo com a necessidade do projetista. Inicia-se a avaliação de uma solução percorrendo todos os CPE's alocados até o HE, no intuito de inserir penalidade naqueles casos em que a distância máxima permitida para alocação de TDR's é violada, considerando-se ou não a existência de ramificações interferentes. Assim sendo a referida avaliação deverá executar o conjunto de iterações a seguir itemizadas.

1. Ao encontrar o primeiro CPE, vá para o próximo passo;
2. crie um vetor denominado trecho desde o CPE( $j$ ) até o HE alocado, para  $j$  a quantidade de CPEs, sendo que neste vetor estão todos os nós da comunicação do referido trecho, que são possíveis locais de instalação de repetidores TDR;
3. crie um vetor binário aleatório, de tamanho equivalente ao do vetor de posição elegíveis de TDR para posições de repetidores, onde "1" representa repetidor alocado neste local e "0" caso contrário;
4. percorra o vetor trecho da posição  $i$ , para  $i$  as posições elegíveis para alocação de TDR até chegar ao HE,
5. avalie o trecho e verifique a existência de ramificação interferente e posteriormente quantifique a distância máxima permitida;
6. caso o trecho ultrapasse o valor máximo da distância permitida, o vetor penalidade armazena a diferença entre o tamanho do trecho e a distância máxima permitida;
7. como um repetidor foi alocado na posição TDR( $i$ ), conforme descrito na iteração 3, vá para a iteração 8, caso contrário vá para a descrita em 10;
8. crie um vetor de penalidade residual, armazene a penalidade neste vetor e zere o vetor penalidade;

9. inicie novo trecho de comunicação, podando o trecho anteriormente analisado;
10. na ausência de TDR, armazene a penalidade deste nó no vetor penalidade e zere a penalidade do nó anterior;
11. mantenha-se no trecho de comunicação;
12. enquanto não alcançar o modem HE, volte para a iteração 4 e prossiga;
13. armazene a soma dos vetor penalidade no vetor penalidade de cada CPE;
14. atualize o vetor CPE e se ainda houver CPE volte à iteração 1;
15. após analisar todos os CPE's, some as penalidades que cada CPE recebeu de acordo com a configuração de repetidores TDR aleatoriamente alocados, armazene a penalidade total que é a soma das penalidades de todos os CPE's e a soma das penalidades armazenadas em residual;
16. armazene no vetor custo o somatório do vetor posição TDR multiplicado pelo custo de cada TDR;
17. soma o custo e a penalidade total e a denomine de Função da Avaliação.

A função avaliação permite realização do planejamento de acordo com o objetivo do planejador. Quando há escassez de recursos financeiros pode-se projetar sistemas priorizando investimentos no interesse do planejador. Por exemplo se o requisito é planejar um sistema que atenda a comunicação BPL sem interrupções às mais diversas topologias, aplica-se a função da avaliação para as  $n$  topologias da rede. Outro exemplo seria se o planejador quisesse um sistema em que mesmo um repetidor tornando-se indisponível não acarretasse em diminuição da taxa de transmissão, na mesma topologia. Mesmo assim, aplica-se a função da avaliação deixando indisponível um TDR por vez. Com isso a flexibilização do sistema dá-se mediante uma função da prioridade de cada área e de cada rede.

Para melhor entendimento da função da avaliação considere a Figura 15 que mostra uma rede elétrica que será usada como meio de transporte de dados PLC e deseja-se alocar repetidores a fim de obter comunicação entre os CPE's e o HE instalados. O modem HE é instalado no nó 1, enquanto os CPE's nos nós 8 e 9. A título de exemplo adota-se como 200 metros a distância máxima permitida entre modems sem ramificações interferentes entre eles, e 100 metros trechos que contenham ramificações que interferem na qualidade da comunicação.

Para que comunicação PLC seja estabelecida sem prejuízo, deseja-se obter uma configuração de repetidores que não gere nenhuma penalidade, ou seja, a distância máxima permitida entre os modems não pode ser ultrapassada considerando-se a existência ou

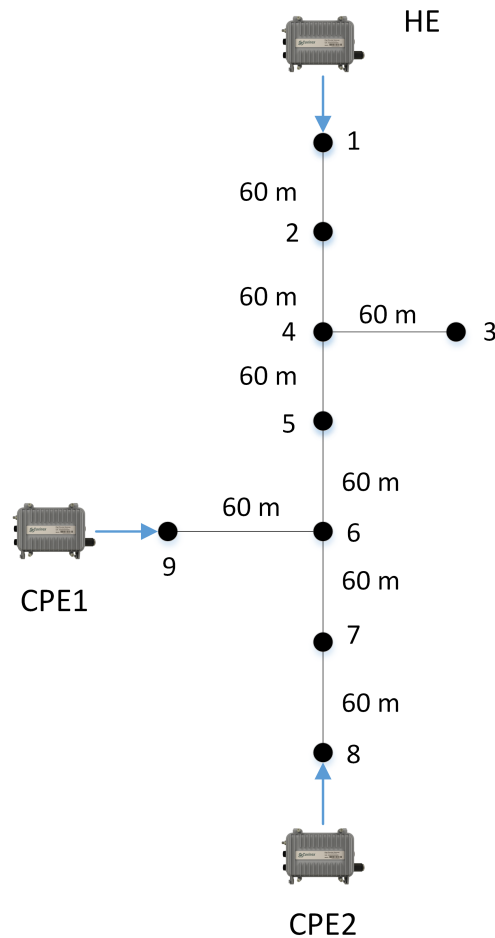


Figura 15 – Exemplo de uma rede elétrica onde pretende-se alocar repetidores para atendimento da comunicação BPL.

ausência de ramificações interferentes entre eles. Quando ultrapassada a distância máxima a comunicação é penalizada.

A Figura 16 ilustra um exemplo de como a função de avaliação penaliza as configurações adotadas. Considerando repetidores alocados nos nós 2 e 7, observa-se que com esta configuração a rede é penalizada com o valor acumulado de 280 metros. Ao observar o CPE1 obtém-se uma penalidade de 140 metros acumulados, ou seja, até o HE o CPE1 ultrapassou a distância máxima permitida acumulada em 140 metros, o CPE2 acumulou ao longo de todo trecho de comunicação até o HE 140 metros de penalidade. Já a Figura 17 assume uma nova configuração de alocação de repetidores onde somente um repetidor é alocado no nó 5. Este sistema possui penalidade acumulada de valor igual a 260 metros, caracterizando esta configuração de alocação de modems não viável para comunicação. A Figura 18 exemplifica a melhor configuração, nela são alocados 2 modems repetidores nos nós 4 e 6. Observa-se que a referente configuração não obteve nenhuma penalidade mesmo considerando as ramificações interferentes, ou seja, não ultrapassou a distância máxima permitida entre modems.

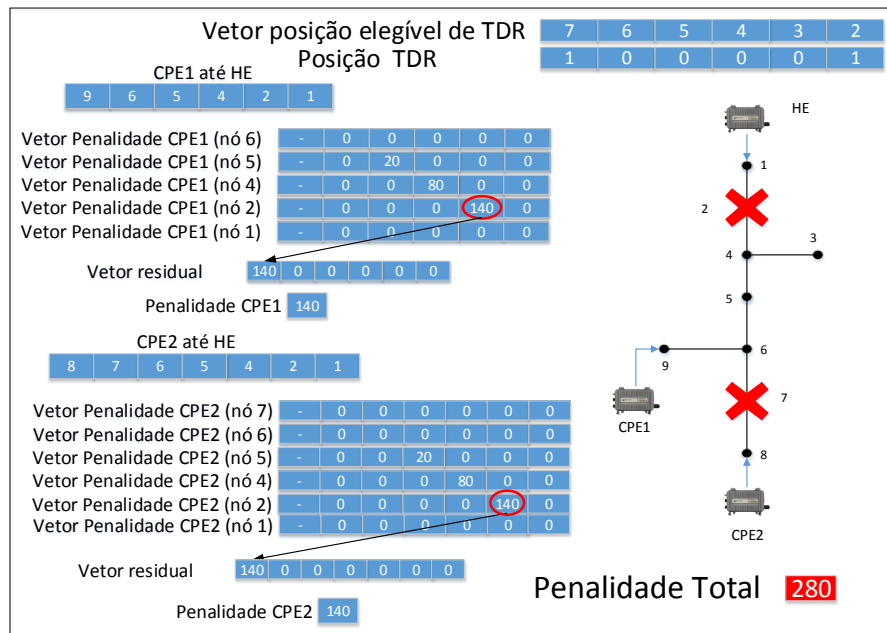


Figura 16 – Exemplo de como funciona a penalização de sistemas de comunicação PLC para atendimento à 2 CPE's com modems repetidores alocados nos nós 2 e 7.

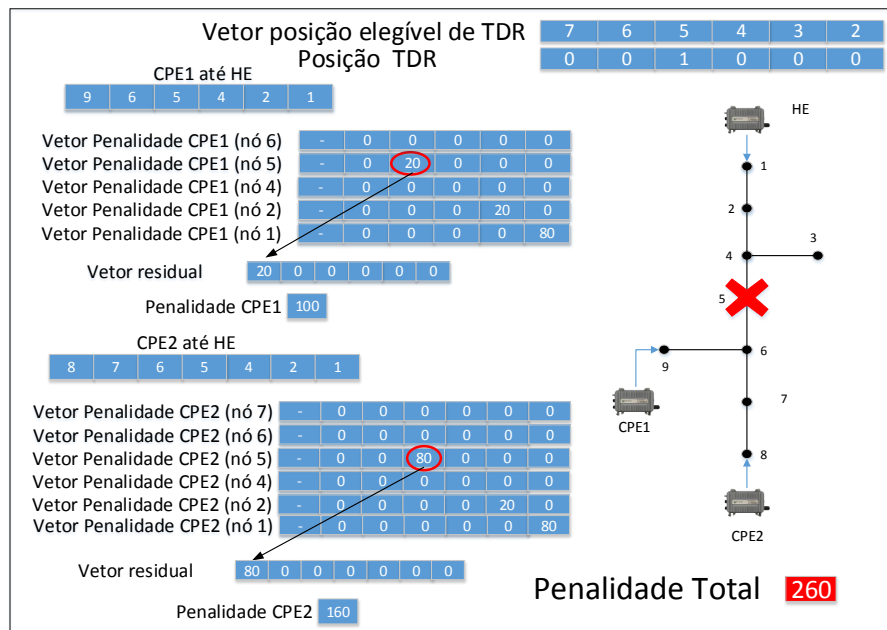


Figura 17 – Exemplo de como funciona a penalização de sistemas de comunicação PLC para atendimento à 2 CPE's com modem repetidor alocado no nó 5.

## 4.5 Solução do Problema via Algoritmo Genético

Detalhes do algoritmo Genético usado neste trabalho são descritos nesta Secção. A modelagem do cromossomo é representada em número binário e a população inicial é gerada aleatoriamente. Os operadores genéticos incidentes nos cromossomos são seleção, cruzamento e mutação.

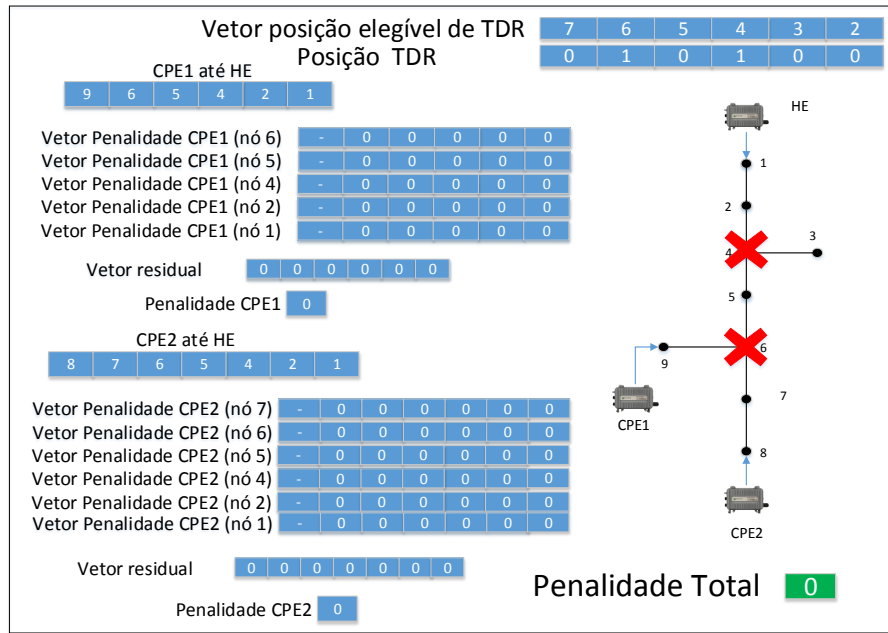


Figura 18 – Exemplo de como funciona a penalização de sistemas de comunicação PLC para atendimento à 2 CPE's com modems repetidores alocados nos nós 4 e 6.

### Seleção

A seleção é a operação genética em que os cromossomos dos indivíduos tidos como mais aptos são escolhidos para formar a base genética da geração subsequente à deles. Neste trabalho foi usada a seleção por roleta, torneiro e seleção aleatória. Para o método da roleta, a probabilidade de cada indivíduo participar da próxima geração é dada por:

$$P_{sel}(S_i) = \frac{f(S_i)}{\sum_{j=1}^N f(S_j)}, \quad (28)$$

para  $S_i$  o indivíduo a ser avaliado,  $f$  a função aptidão,  $S_j$  o indivíduo  $j$  da população e  $N$  o número total de indivíduos.

Para seleção por torneio existe um parâmetro denominado de **tamanho do torneio** que define quantos indivíduos dentro da população serão aleatoriamente escolhidos para competir e dentre esses indivíduos o que tiver maior aptidão será selecionado, ganha o torneio e os outros serão descartados. Para o método de seleção aleatória serão escolhidos indivíduos aleatoriamente dentro da população para ser submetidos aos operadores de cruzamento e mutação. Neste trabalho, três foi o valor escolhido para o tamanho do torneio.

### Cruzamento

Com os indivíduos já selecionados pelo processo de seleção é aplicado o cruzamento para inserir novos indivíduos na população. Neste trabalho foi utilizado cruzamento de ponto único, cruzamento de dois pontos e cruzamento uniforme detalhados a seguir.

Cruzamento de ponto único: Dado dois pais, uma posição do cromossomo maior que zero e menor que o número total de genes é escolhida aleatoriamente como ponto de corte, de modo que os segmentos a partir deste ponto sejam trocados.

Cruzamento de dois pontos: Maneira encontrada de evitar e reduzir a polarização no processo de cruzamento, em que é feito o cruzamento de dois pontos, onde são escolhidos dois pontos de corte e trocando-se os segmentos dos indivíduos em três partes.

Cruzamento uniforme: Neste caso cada gene do descendente é criado copiando o gene correspondente de um dos pais, escolhido de acordo com uma máscara de cruzamento gerada aleatoriamente. Onde houver 1 na máscara de cruzamento, o gene correspondente será copiado do primeiro pai e onde houver 0 será copiado do segundo. O processo é repetido com os pais trocados para produzir o segundo descendente. Uma nova máscara de cruzamento é criada para cada par de pais.

Existe certa possibilidade de ocorrência de cruzamento e ela não deve ser muito pequena para evitar o elitismo e nem muito alta para não dificultar a busca do AG. Desta forma a probabilidade de cruzamento deve estar entre 60% e 90%. Neste trabalho utiliza-se 80% para esta probabilidade.

### **Mutação**

A mutação representa alterações aleatórias que ocorrem nos genes do cromossomo. A probabilidade de mutação varia entre 0,1% e 5%, sendo que neste trabalho usa-se 0,3%, e ocorrem para resgatar materiais genéticos perdidos durante o processo evolutivo.

### **Modelagem**

No problema de alocação de repetidores TDR's para comunicação BPL via AG, cada vetor solução representa todos os postes sem HE e sem CPE, em que podem ser alocados tais repetidores ou seja, um conjunto de repetidores proposto para solução do problema. Os elementos do vetor contêm valores binários igual a "1" quando o repetidor está alocado naquele determinado poste e "0" caso contrário.

O custo associado a cada solução proposta é obtida somando-se a quantidade de repetidores presente na solução.

A Figura 19 mostra o pseudocódigo do algoritmo Genético utilizado neste trabalho. Inicia-se o código definindo-se o tamanho da população de indivíduos, alguns parâmetros de seleção, cruzamento, mutação e o número de gerações do algoritmo. A população inicial é gerada de forma aleatória e são avaliadas suas aptidões de acordo com a função de avaliação que deseja-se minimizar. Então aplica-se os operadores genéticos, faz-se uma nova avaliação da aptidão e seleciona-se como solução do problema a melhor aptidão encontrada na população ao final de todas as gerações.



```

1. Número de população  $P \leftarrow 100$ ;
2.  $MaxIt \leftarrow 500$ ;
3.  $Pop(i) \leftarrow rand[0,1]$ ;
4.  $Sel \leftarrow \emptyset$ ;
4.  $Porcentagem\ Crossover \leftarrow 0,8$ ;
5.  $Porcentagem\ Mutação \leftarrow 0,3$ ;
7.  $f_i = f(Pop(i))$ 
7. Escolha o Método de Seleção;
8. Caso  $Sel \leftarrow 1$ , faça
8.     Seleção  $\leftarrow$  Seleção proporcional;
10. Caso  $Sel \leftarrow 2$ , faça
9.     Seleção  $\leftarrow$  Seleção por torneiro;
12. Caso  $Sel \leftarrow 3$ , faça
10.     Seleção  $\leftarrow$  Seleção aleatória;
14. Enquanto  $it < MaxIt$ , faça
16.     Faz – se a Seleção dos indivíduos
11.     Aplica – se a Operação de Crossover
12.     Aplica – se a Operação de Mutação
17.      $f_i' \leftarrow f(Pop(i)')$ 
18.      $BestSol \leftarrow Best\ f_i'$ 
13.      $it \leftarrow it + 1$ ;
14. Fim do Enquanto;
15.  $Sol \leftarrow BestSol$ ;

```

Figura 19 – Pseudocódigo para o AG

## 4.6 Solução do Problema via NBPSO

Quando aplica-se a metaheurística New Binary Particle Swarm Optimization para solucionar o problema, define-se um vetor binário de ordem  $l$  que representa os postes aptos a receberem repetidores, sendo "1" para postes com repetidores e "0" para postes sem repetidores alocados, para  $N$  correspondente ao número de partículas da população.

A população inicial é gerada de forma aleatória, sendo que a cada iteração são gerados  $p\_best$  e  $g\_best$  minimizando a função de avaliação e atualizando os parâmetros de

posição e velocidade, até atingir o número de iterações proposta. Ao final das iterações a melhor solução encontrada em toda população de partículas é o  $g\_best$ .

A Figura 20 apresenta como o algoritmo NBPSO se comporta neste trabalho. O enxame é dito como uma população de 100 indivíduos (partículas), com dimensão referente ao número de nós elegíveis para alocar repetidores. O número de iterações “ $K$ ” será utilizado neste algoritmo como critério de parada.

```

1. Número de partículas  $P \leftarrow 100$ ;
2.  $K \leftarrow 100$ ;
3.  $x_{id} \leftarrow rand[0,1]$ ;
4.  $p\_best \leftarrow rand[0,1]$ ;
5.  $g\_best \leftarrow rand[0,1]$ ;
6.  $v_{id} \leftarrow \text{velocidade inicial}$ ;
7. Enquanto  $k < K$ , faça
8.      $f_i \leftarrow f(x_{id})$ ;
9.      $p\_best \leftarrow \text{new } p\_best$ ;
10.     $g\_best \leftarrow \text{new } g\_best$ ;
11.     $v_{id} \leftarrow v'_{id}$ ;
12.     $x_{id} \leftarrow x'_{id}$ ;
13.     $k \leftarrow k + 1$ ;
14. Fim do Enquanto;
15.  $Sol \leftarrow g\_best$ ;

```

Figura 20 – Pseudocódigo para o NBPSO

Inicialmente gera-se a matriz de posições iniciais  $x_{id}$ , onde  $i$  é o número de partículas e  $d$  é a dimensão de cada partícula. Também são gerados valores de  $p\_best$  e  $g\_best$  da população inicial de forma aleatória. Em seguida atualiza-se a velocidade inicial à luz das posições  $x_{id}$  iniciais e aos valores de parâmetros atribuídos na equação de velocidade. Enquanto não for satisfeito o critério de parada, calcula-se a função da avaliação para cada partícula desta população.

Conforme explicado anteriormente, a função da avaliação quantifica o desempenho de cada partícula. Com as partículas do enxame avaliadas, extraem-se os novos  $p\_best$  e o

$g\_best$ , isto é, a melhor posição encontrada pela partícula e pelo enxame. Assim as novas velocidades  $v'_{id}$  são atualizadas conforme a equação (5) e suas posições são atualizadas como descreve a equação (6). Diante das novas posições, caso o critério de parada tenha sido atingido, a solução do problema encontrada é a melhor posição globalmente atingida ou seja, a solução  $g\_best$ . Caso contrário, aplica-se novamente a função da avaliação a este enxame, atualizam-se os valores de  $p\_best$  e  $g\_best$ , caso seja apresentada uma solução melhor, seguido da velocidade e posição de cada partícula do enxame. O laço prossegue até o atingir o critério de parada.



## 5 Descrição dos Testes e Análise dos Resultados

A descrição dos testes realizados com a metodologia proposta para a alocação de modems BPL e a análise dos resultados são apresentadas neste Capítulo.

Os sistemas de testes IEEE de 13, 37 e 123 barras foram utilizados de modo a testar preliminarmente a metodologia. Para cada um destes sistemas IEEE adaptou-se chaves, a fim de testar vários cenários topológicos assumidos pela rede elétrica. Cada um dos sistemas de testes foi experimentado a alocação de repetidores BPL para todas as topologias da rede elétrica e para a possível perda de 1 repetidor, à luz das ramificações que interferem destrutivamente à comunicação. Na presença de tais ramificações há a necessidade de um maior número de repetidores. Desta maneira, buscou-se avaliar o mínimo custo para o projeto de uma rede BPL autônoma e resiliente.

Além dos sistemas IEEE, o algoritmo para solucionar o problema de alocação de repetidoras BPL foi testado em uma rede de MT real, de aproximadamente 1,63 km de comprimento. Esta rede é utilizada como meio de comunicação para trafegar dados de automação e videomonitoramento de 3 poços de petróleo. Futuramente uma rede de MT, de comprimento muito maior, parte do sistema elétrico brasileiro, localizada em Rio Preto do Oeste, município de São Mateus, norte do estado do Espírito Santo será investigada a fim de trafegar dados de automação e imagens em tempo real através dela para 6 poços de petróleo.

Para solucionar o problema de alocação de repetidores foram usadas metaheurísticas que partiam de solução inicial aleatória para buscar melhores soluções. Cada metaheurística detém seus parâmetros de controle. Para o AG, os testes foram executados 4 vezes em cada método de seleção a partir de uma solução aleatória independente, e o resultado foi uma média aritmética de todas as execuções. A parametrização ocorreu conforme estudos anteriores [[Rocha 2010](#)]:

- tamanho da população: 100
- número de iterações: 500
- tipo de cruzamento: Variando aleatoriamente entre cruzamento de um ponto, cruzamento de dois pontos e cruzamento uniforme
- probabilidade de mutação: 0,3
- método de seleção: Roleta, Torneio e Seleção aleatória;

- tamanho máximo permitido entre modems com presença de ramificações interferentes=350 m;
- tamanho máximo permitido entre modems com ausência de ramificações interferentes=700 m.

Já para o algoritmo NBPSO, a metaheurística foi executada 4 vezes partindo-se de soluções iniciais aleatórias e foram utilizados os parâmetros conforme [Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki e Maghfoori-Farsangi 2008]:

- tamanho da população: 100
- número de iterações: 100
- tamanho de cada variável: Número de nós aptos a alocar os repetidores
- dimensão das variáveis: Tamanho das variáveis\* Número de variáveis
- fator de inércia mínimo: 0,1
- fator de inércia máximo: 0,6
- constantes  $c_1$  e  $c_2$ : 2
- tamanho máximo permitido entre modems com presença de ramificações interferente=350 m;
- tamanho máximo permitido entre modems com ausência de ramificações interferentes=700 m.

Para os testes com o sistema IEEE de 123 barras aumentou-se o número da população inicial para 300 indivíduos com o objetivo de garantir melhores resultados em ambas metaheurísticas propostas.

Os valores de parâmetros foram ajustados conforme testes preliminares. Vale ressaltar que os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de execução de códigos computacionais desenvolvidos utilizando a linguagem Matlab [Mathworks 2016].

## 5.1 Dados dos Sistemas de Testes IEEE Utilizados

Dois tipos de simulações foram propostas aos testes IEEE. Na primeira simulação projeta-se uma rede de comunicação PLC para atender 2 CPE's instalados em locais arbitrariamente escolhidos. E na outra simulação estima-se alocar repetidores que atendam múltiplos CPE's, para isso instala-se CPE's em todos nós folha, ou seja, nós terminais da rede elétrica. O objetivo de aumentar o número de CPE's é avaliar a convergência

e tempo computacional das metaheurísticas propostas quando aumenta-se o número de CPE's atendidos.

### Sistema IEEE-13 barras

A configuração do sistema IEEE de 13 barras é apresentada na Figura 21. Com a finalidade de testar o algoritmo para diversas configurações de topologia que as redes elétricas podem assumir, foi adaptado uma chave de manobra entre os nós 634 e 675 a fim de possibilitar testes com reconfiguração da topologia da rede elétrica.

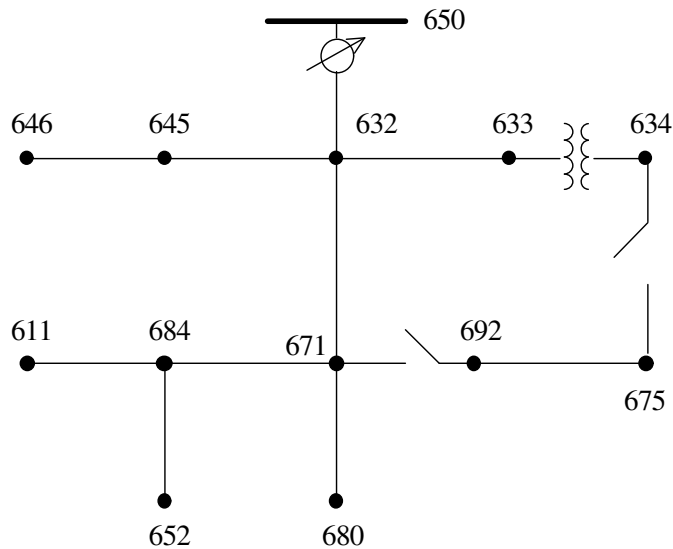


Figura 21 – Sistema de testes IEEE de 13 barras adaptado

No problema de alocação de repetidores o projetista precisa conhecer e considerar quantidade e a localização dos modems CPE's e do modem HE instalados conforme demanda-se o projeto. Para fins de testes, a quantidade e a localização dos CPE's escravos para o sistema IEEE 13 barras serão arbitrariamente escolhidas conforme ilustrada as Figuras 22 e 23. As simulações são descritas conforme:

- Simulação 1:

HE: 650;

CPE: 611 e 675.

- Simulação 2:

HE: 650;

CPE: 646,634,675,611,652,680 e 692.

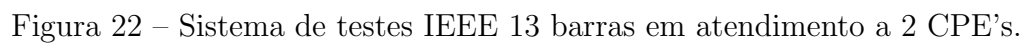


Tabela 4 – Alteração nas configurações no sistema IEEE-13 barras

### Sistema IEEE-37 barras



O sistema IEEE de 37 barras é apresentado na Figura 24. Atenta-se para a adaptação ao modelo IEEE original, ao qual insere-se uma chave entre os nós 731 e 740 com o propósito de realizar testes com diferentes configurações de topologia.

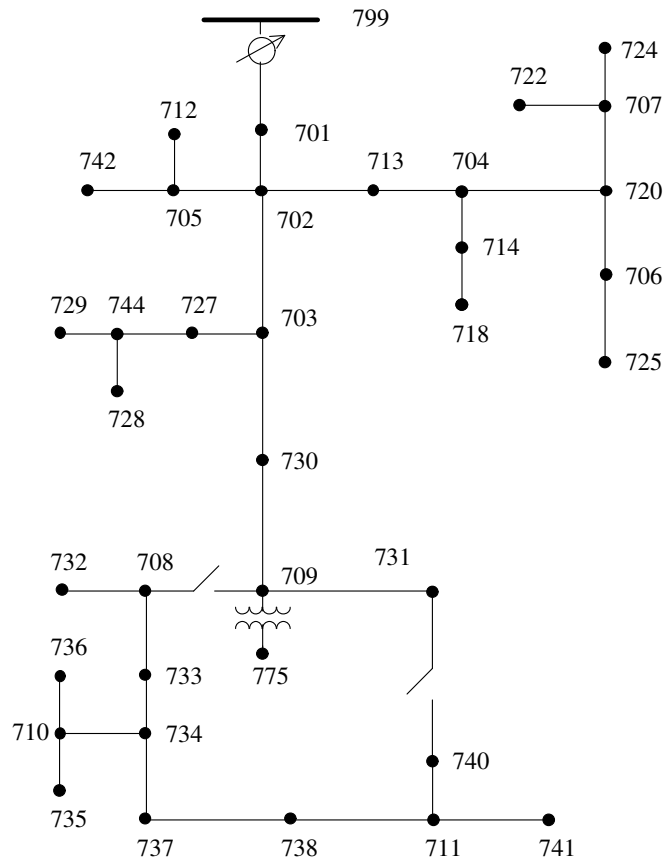


Figura 24 – Sistema de testes IEEE de 37 barras

A título experimental a quantidade e a localização dos modems CPE's e do modem HE instalado para o sistema IEEE 37 barras, foram arbitrariamente escolhidos e são ilustrados nas Figuras 25 e 26. As simulações testadas são descritas como:

- Simulação 1:

HE: 799;

CPE: 729 e 741 .

- Simulação 2:

HE: 799;

CPE: 722, 724, 725, 718, 712, 742, 729, 728, 732, 736, 735, 741, 745 e 743 .

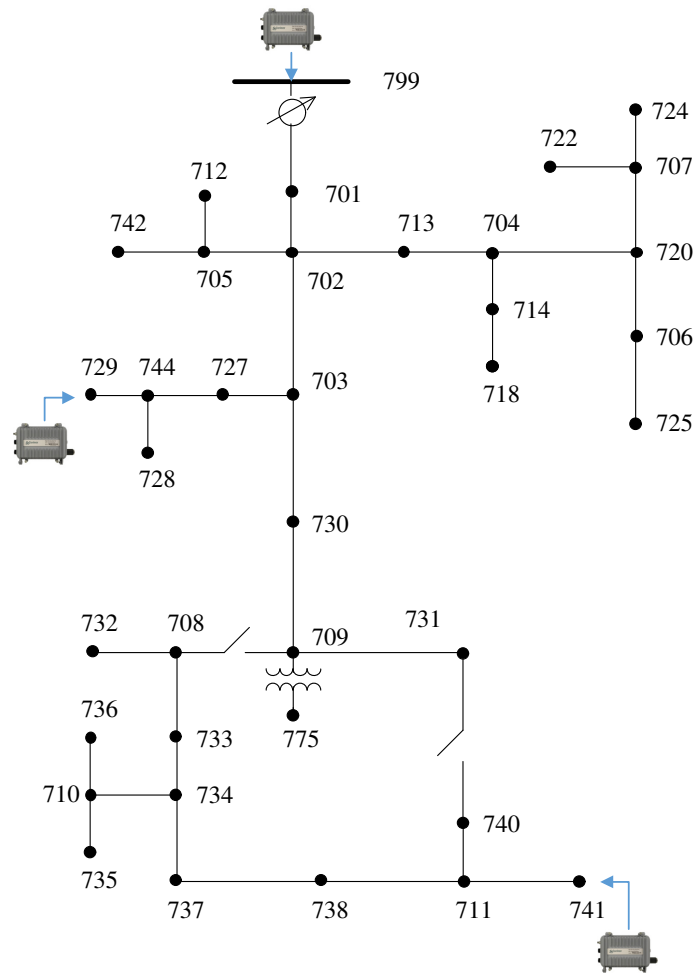


Figura 25 – Sistema de testes IEEE 37 barras em atendimento a 2 CPE's.

Tabela 5 – Alteração nas configurações no sistema IEEE 37 barras

Topologia	Ramo fora de operação
1	731-740
2	708-709

Na Tabela 5 estão representadas as chaves responsáveis pela reconfiguração dos cenários topológicos do sistema de testes IEEE-37 barras.

### Sistema IEEE-123 barras

A configuração do sistema IEEE de 123 barras está ilustrado na Figura 27. Nota-se o sistema IEEE-123 contempla chaves, as quais foram empregadas para realizações dos testes de reconfiguração topológica.

O modem HE e seus escravos CPE's são instalados arbitrariamente para realizações dos testes. A Figura 28 ilustra a simulação 1, onde são instalados de 2 CPE's e a Figura 29 ilustra a simulação 2 em que há instalação de múltiplos CPE's, conforme descrito a seguir:

- Simulação 1:

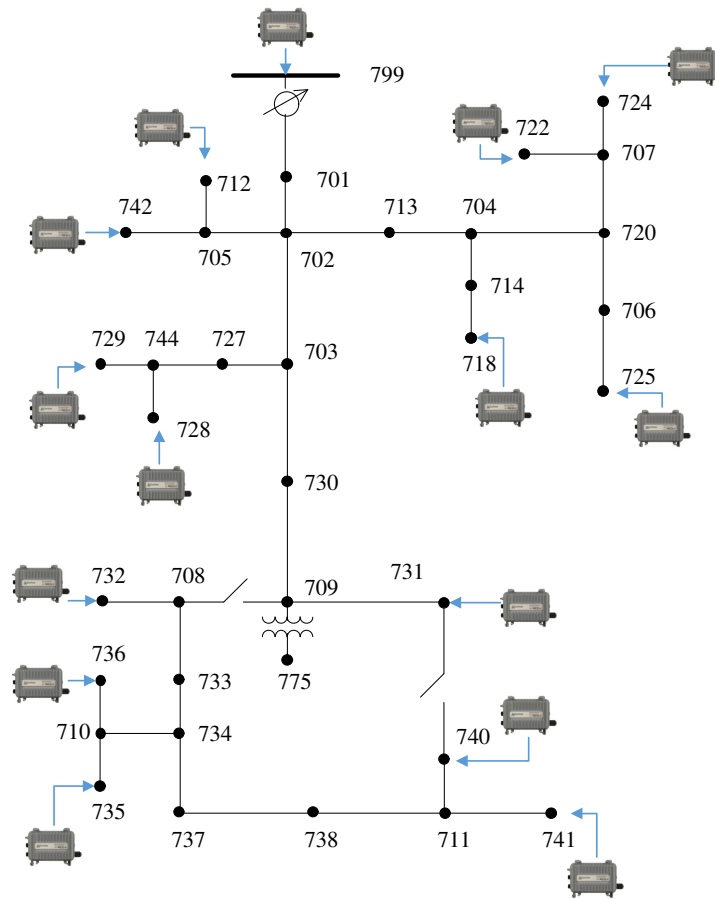


Figura 26 – Sistema de testes IEEE 37 barras em atendimento a múltiplos CPE's.

HE: 150.

CPE: 32 e 83.

- Simulação 2:

HE: 150.

CPE: 32, 33, 24, 22, 20, 11, 10, 2, 4, 6, 12, 16, 17, 96, 56, 59, 92, 90, 88, 83, 85, 79, 75, 71, 104, 107, 111, 114, 48, 46, 43, 41, 37, 39, 66, 152, 151, 135, 160, 94 e 350.

Para realização de simulações com reconfiguração de topologias diferentes foram definidos 2 cenários conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Alteração nas configurações no sistema IEEE 123 barras

Topologia	Ramo fora de operação
1	250-251, 450-451, 151-300, 54-94
2	250-251, 450-451, 151-300, 60-160

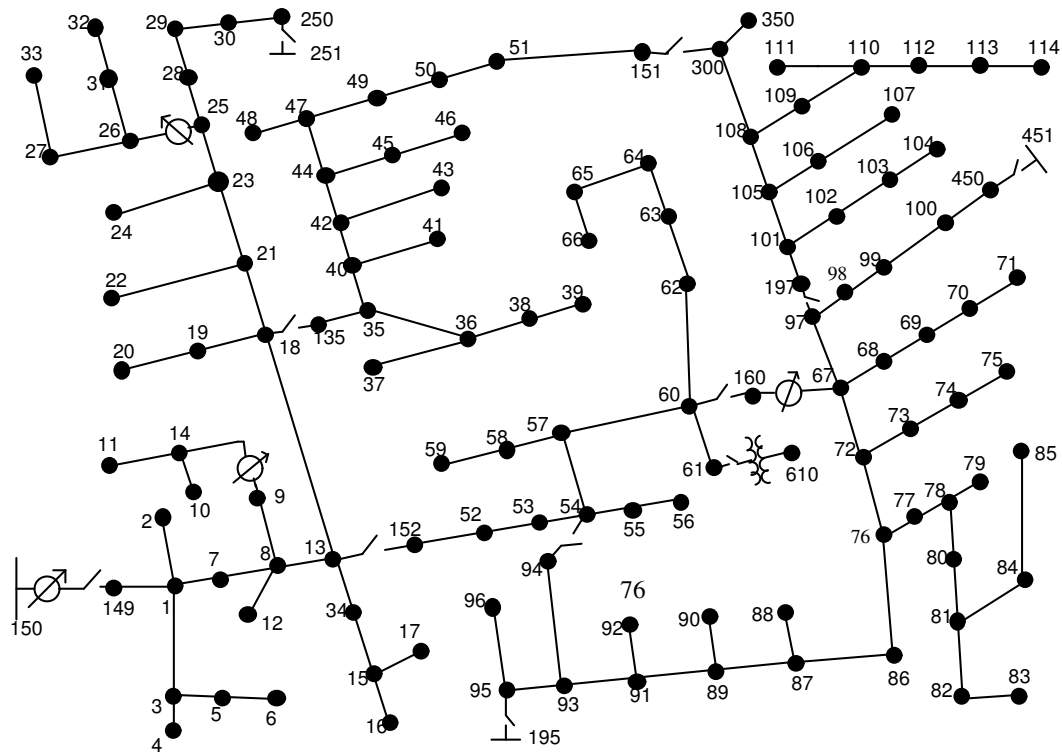


Figura 27 – Sistema de testes IEEE de 123 barras

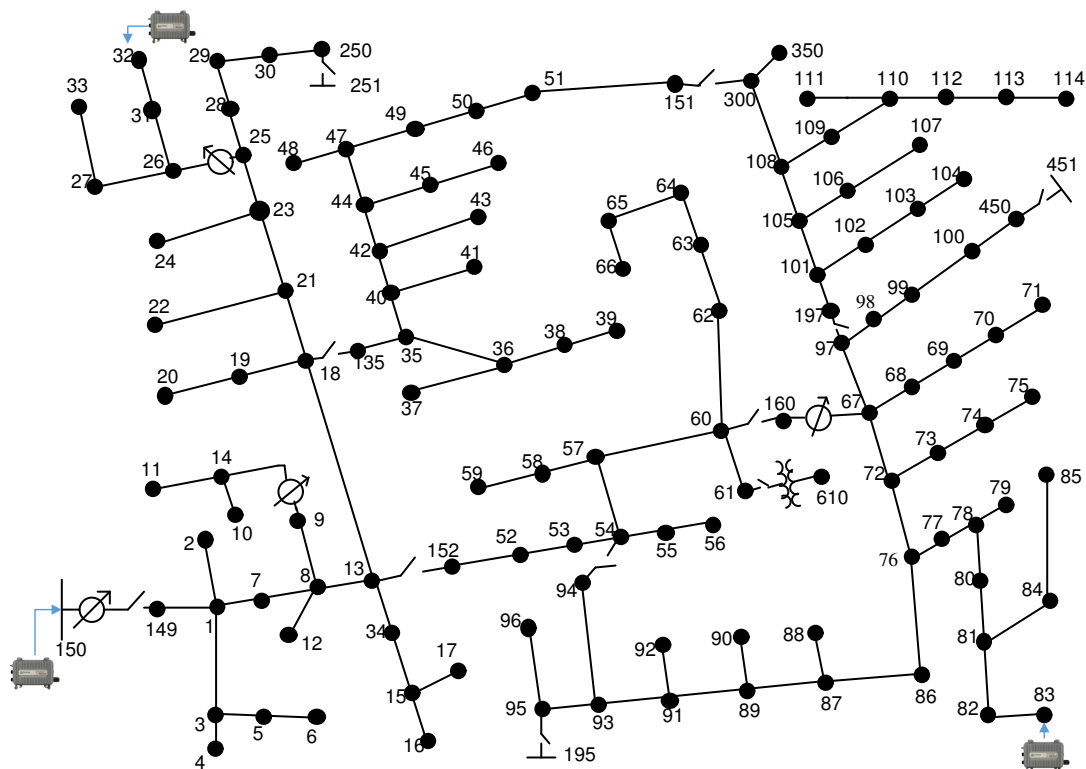


Figura 28 – Sistema de testes IEEE 123 barras em atendimento a 2 CPE's

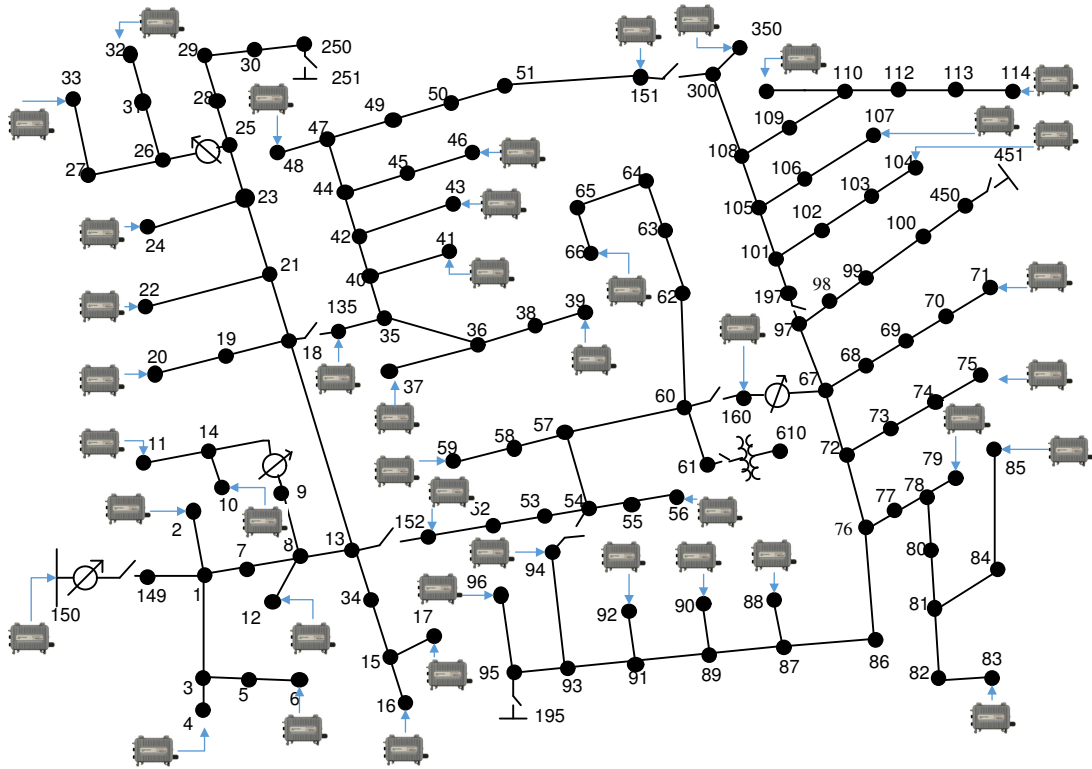


Figura 29 – Sistema de testes IEEE 123 barras em atendimento a múltiplos CPE's

## 5.2 Testes nos Sistemas IEEE com Análise de Presença de Ramificações Interferentes

As redes elétricas são altamente capilarizadas justamente para assistir uma grande demanda de usuários, sendo esta alta capacidade de penetração um atrativo para comunicação de dados. Sabe-se que as redes elétricas não foram concebidas para a finalidade de transportar dados. Estima-se que a capilaridade das redes elétricas introduzem efeitos nocivos à comunicação PLC quando tem o seu comprimento na ordem de 10% em relação ao comprimento do trecho principal. Derivações nesta ordem de comprimento são denominadas na literatura como ramificações interferentes. Derivações com comprimentos acima de 1,5 vezes em relação ao comprimento do trecho principal influenciam de maneira irrelevante à comunicação de dados PLC [Anatory e Theethayi 2010], [Castor et al. 2016], [CORINEX 2014], [Oliveira et al. 2016].

Com isso os testes realizados nesta Seção avaliam as configurações contempladas com ramificação interferente, ou ramificação não interferente. Com a presença de ramificações interferentes todo o trecho de comunicação sofre adaptação na distância máxima permitida entre modems para anular os efeitos destrutivos destas ramificações e manter uma comunicação PLC de qualidade.

### 5.2.1 Testes Sem Reconfiguração de Topologia e Sem Perda de 1 TDR

Os primeiros testes realizados utilizaram-se de uma topologia básica, alocando modems repetidores desconsiderando reconfigurações no cenário topológico da rede elétrica e sem a possibilidade da perda de um modem repetidor qualquer. Os resultados encontrados destas simulações estão apresentados nas Tabelas 7 e 8. Nota-se que o algoritmo fez alocação de 2 repetidores para o sistema de testes IEEE de 13 barras na assistência à 2 CPE's. Quando aumenta-se o número de CPE's atendidos para 7, demanda-se mais 1 repetidor para suportar todos CPE's mantendo a mesma qualidade da comunicação. Este resultado sugere que o algoritmo obteve a solução ótima do problema visto que seu desvio padrão possui valor igual a zero em ambas metaheurísticas aplicadas.

De fato, o aumento de números de CPE's pode vir a requerer um maior número de repetidores, como observado também no sistema IEEE de 37 barras. Quando efetua-se testes para atendimento à 2 CPE's, carece-se de alocação de 8 repetidores de sinal. Conforme o número de CPE's instalados é aumentado, deve-se alocar 12 modems TRD para manutenção da qualidade da comunicação PLC requerida. A solução encontrada no sistema IEEE de 37 barras é estimada como uma solução ótima do problema por ter seu desvio padrão de valor igual a zero.

Em relação ao sistema IEEE de 123 barras, constata-se que quando instalados 2 CPE's são necessários alocar 9 repetidores para manutenção da comunicação PLC dentro das especificações da metodologia adotada. De fato, quando aumenta-se o número de CPE's demandados pela comunicação PLC, necessita-se de um maior número de repetidores do sinal, portanto nota-se que para atendimento à 41 CPE's escravos foram necessários 27 modems TDR's para estabelecimento da comunicação BPL em todos modems escravos instalados.

Quando compara-se o desempenho dos algoritmos de busca utilizados nesta pesquisa, nota-se que o AG obteve melhor desempenho nos testes analisados. Quando aumenta-se o número de barras no sistema testado, o algoritmo NBPSO apresentou um desempenho aquém do AG tanto em relação a qualidade da solução do problema quanto ao tempo computacional de execução. De fato, repara-se um aumento do tempo de execução quando é aumentado o número de modems escravos instalados para comunicação PLC, porém o tempo médio gasto para execução do NBPSO é muito menos atraente que o do AG.

A Tabela 9 indica a localização dos modems TDR para testes com a presença de ramificações interferentes, sem reconfigurações de topologia e sem a perda de 1 TDR. Expõe-se o local onde os modems TDR deverão ser alocados para ambas simulações propostas, tanto para Simulação 1 que suporta apenas 2 CPE's, quanto para Simulação 2 onde são suportados múltiplos CPE's.

Tabela 7 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 2 CPE's.

Sistema	Metaheurística	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
IEEE-13	AG	2	2	0	23,0
	NBPSO	2	2	0	7,34
IEEE-37	AG	8	8	0	34,9
	NBPSO	8	8	0	166,83
IEEE-123	AG	9	9,48	0,51	406
	NBPSO	10	11,50	1,73	675

Tabela 8 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 7 CPE's no sistema IEEE-13, 14 CPE's no sistema IEEE-37 e 41 CPE's no sistema 123.

Sistema	Metaheurística	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
IEEE-13	AG	3	3	0	57,51
	NBPSO	3	3	0	228,72
IEEE-37	AG	12	12	0	221,16
	NBPSO	12	12	0	886
IEEE-123	AG	27	27,5	0,57	5084,83
	NBPSO	27	28,25	0,95	11663,51

Tabela 9 – Localização dos modems TDR para ambas simulações realizadas, considerando a presença de ramificações interferentes, de acordo com as metaheurísticas utilizadas.

Sistema	Metaheurística	Localização de modems TDR
<b>Com 2 CPE's Instalados</b>		
IEEE-13	AG	632,671
	NBPSO	632,671
IEEE-37	AG	701,702,703,730,733,734,737,711
	NBPSO	701,702,703,730,733,734,737,738
IEEE-123	AG	7,13,18,25,53,57,76,80,160
	NBPSO	8,13,18,25,53,57,60,76,78,81
<b>Com Múltiplos CPE's Instalados</b>		
IEEE-13	AG	632,671,684
	NBPSO	632,671,684
IEEE-37	AG	701,704,707,720,702,703,730,708,710,734,737,738
	NBPSO	701,704,707,720,702,703,709,708,710,734,737,711
IEEE-123	AG	8,13,18,21,26,36,42,50,53,57,60,64,68,72,73,78,81,84,86,91,103,105,108,110,35,1,197
	NBPSO	8,13,18,21,26,36,42,50,53,57,60,64,68,72,73,78,81,84,86,91,103,105,108,110,35,1,197

### 5.2.2 Testes Com Reconfiguração de Topologia e Sem Perda de 1 TDR

As redes elétricas são redes dinâmicas e sofrem alterações em sua topologia durante sua operação, manutenção, quando atuam dispositivos de proteção, entre outros. A descontinuidade física do meio acarreta problemas de interrupção do sinal PLC. Para isso, apresenta-se uma metodologia que garanta resiliência de maneira autônoma perante as alterações de cenários topológicos nas redes elétricas.

A Tabela 10 e a Tabela 11 dispõe resultados considerando alterações de cenários topológicos dos sistemas de testes IEEE para atendimento à 2 CPE's e numa posterior avaliação atendimento à múltiplos CPE's, respectivamente.

Ao comparar os resultados obtidos com os resultados anteriores, observa-se que para o sistema IEEE-13 barras, ocorre um aumento de 1 repetidor quando são assistidos 2 CPE's. Ao aumentar-se o número de CPE's elevou-se para 5 o número de modems repetidores necessários ao atendimento desta comunicação.

Para o sistema IEEE-37 nota-se um aumento de 2 TDR's para simulação 1 em relação ao cenário anterior (sem reconfigurações topológicas), e não ocorreu aumento do número de repetidores para assistir 14 modems escravos instalados para comunicação em banda larga ou seja, os mesmos 12 TDR's propostos atendem 2 configurações do sistema IEEE 37 barras, sem prejuízo à comunicação PLC.

E para o sistema IEEE-123, quando comparados aos resultados anteriores, observa-se na melhor solução encontrada um aumento de 2 TDR's na simulação 1, num total de 11 modems TDR's alocados. E um acréscimo de 2 TDR's para atendimento aos múltiplos CPE's instalados na simulação 2, totalizando 29 modems repetidores.

Observa-se pelas Tabelas 10 e 11 que o algoritmo de busca NBPSO não convergiu para bons resultados com um tempo computacional bastante elevado em comparação ao AG, em especial, quando analisa-se o sistema IEEE de 123 barras, portanto o algoritmo NBPSO requer um melhor ajuste de parâmetros para obtenção de melhores soluções.

Tabela 10 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, com reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 2 CPE's.

Sistema	Metaheurística	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
IEEE-13	AG	3	3	0	45,92
	NBPSO	3	3	0	14,77
IEEE-37	AG	10	10,17	0,38	68,34
	NBPSO	10	10,25	0,58	332,83
IEEE-123	AG	11	12,28	1,23	743
	NBPSO	13	14,75	1,25	1436



Tabela 11 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, com reconfiguração de topologia e sem perda de 1 TDR para instalação de 7 CPE's no sistema IEEE-13, 14 CPE's no sistema IEEE-37 e 41 CPE's no sistema 123.

Sistema	Metaheurística	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
IEEE-13	AG	5	5	0	118,32
	NBPSO	5	5	0	476,39
IEEE-37	AG	12	12	0	406
	NBPSO	14	14,75	0,5	1750,67
IEEE-123	AG	29	30	1,41	11504,5
	NBPSO	35	36,75	1,25	21776,44

Os testes propostos nesta Seção preveem a presença de ramificações interferentes, reconfigurações topológicas da rede elétrica, porém não contemplam a perda de 1 TDR. Os locais eleitos onde os modems TDR's deverão ser alocados são expostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Localização dos modems TDR para ambas simulações realizadas, considerando alterações topológicas da rede elétrica, de acordo com as metaheurísticas utilizadas.

Sistema	Metaheurística	Localização de modems TDR
<b>Com 2 CPE's Instalados</b>		
IEEE-13	AG	632,633,671
	NBPSO	632,633,671
IEEE-37	AG	701,702,703,709,708,734,737,738,740,731
	NBPSO	701,702,703,730,708,734,737,738,740,731
IEEE-123	AG	8,13,18,25,57,60,76,80,86,91,52
	NBPSO	13,18,25,53,54, 57,60,76,77,80,86,89,1
<b>Com Multiplos CPE's Instalados</b>		
IEEE-13	AG	632,671,675,684,634
	NBPSO	632,633,671,675,684
IEEE-37	AG	701,704,707,720,702,703,709,708,710,734,737,711
	NBPSO	701,704,707,720,702,703,730, 733,710,734,737,738,731,740
IEEE-123	AG	8,13,18,23,26,36,40,49,54,57,60,64,68,72,73, 76,78,81,84,86,89,91,103,105,108,110,35,1,101
	NBPSO	3,7,8,9,13,18,21,26,38,42,49,54,57,60,62,64,68, 69,73,74,76,78,81,84,86,91,103,106,108,110,35,1,67,197,101

### 5.2.3 Testes Sem Reconfiguração de Topologia e Com Perda de 1 TDR

Com o propósito de manutenção da comunicação PLC de forma autônoma, nesta Seção são simulados testes onde contempla-se a perda de 1 TDR qualquer, ou seja, 1 TDR

pode tornar-se indisponível ao sistema sem prejuízos à comunicação de dados. As Tabelas 13 e 14 evidenciam os resultados angariados.

Nota-se que para o sistema de testes IEEE de 13 barras, 4 modems repetidores foram alocados para atendimento a 2 CPE's projetados, quando aumenta-se número de CPE's são necessários 5 modems repetidores de sinal para atender a todos CPE's demandados. Podemos sugerir que estas são soluções ótimas para ambas simulações, em ambas metaheurísticas aplicadas, pois o valor do desvio padrão foi igual à zero.

Quando se analisa o sistema de teste de 37 barras o número de repetidores alocados para atender 2 CPE's é de 12 modems TDR's, estima-se que esta solução seja a solução ótima pelo desvio padrão encontrado nas duas metaheurísticas aplicadas ter o valor igual a zero. Quando aumenta-se o número de CPE's para comunicação de dados, o número necessário de TDR's para este sistema foi de 20 TDR's.

Quanto ao sistema de teste IEEE de 123 barras, nota-se que foram necessários 17 repetidores na simulação 1 (atendimento à 2 CPE's) e 52 modems repetidores na simulação 2 (atendimento à múltiplos CPE's), observa-se que o NBPSO não obteve bons resultados quando aumenta-se o número de barras do sistema, além de elevado tempo computacional, a quantidade de modems alocados foi superior ao do Algoritmo Genético.

Uma importante análise a respeito dos sistemas de testes IEEE usados neste trabalho, é que estes sistemas possuem em alguns trechos o comprimento limítrofe com a distância máxima permitida para alocação de equipamentos PLC, segundo a metodologia proposta neste estudo. Com isso, a perda de um TDR em um local crítico extrapola o limite da distância entre modems.

A fim de exemplificar esta peculiaridade, tome o sistema IEEE de 13 barras ilustrado na Figura 21. O comprimento entre os ramos 650-632 e 632-671, é aproximadamente o limite da distância estabelecida para alocação de modems sem ramificações interferentes, entretanto os nós 632 e 671 são locais eleitos pela metodologia como bons locais de alocação de modems. Observa-se que perder o TDR alocado em 632, faz com que o trecho entre o HE (localizado no nó 650) e próximo TDR localizado em 671 torna-se extenso e extrapola distâncias máximas propostas nesta metodologia, tornado o TDR alocado em 632 um TDR que denominados como TDR crítico, ou seja, se perdido trará algum prejuízo à comunicação PLC estabelecida nesta rede elétrica. Esses limitadores variam e dependem das especificações da rede elétrica a qual deseja-se utilizar para comunicação de dados PLC. A Tabela 15 aponta a relação de TDR's críticos para os sistemas de testes IEEE experimentados.

A Tabela 16 indica a localização dos modems TDR para testes com a presença de ramificações interferentes, alterações topológicas da rede elétrica e contemplação da perda de 1 TDR, conforme metodologia proposta.

Tabela 13 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e com perda de 1 TDR para instalação de 2 CPE's.

Sistema	Metaheurística	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
IEEE-13	AG	4	4	0	91,83
	NBPSO	4	4	0	154,97
IEEE-37	AG	12	12	0	443,76
	NBPSO	12	12	0	1510,2
IEEE-123	AG	17	17	0	1706,03
	NBPSO	19	20	1,15	23301,78

Tabela 14 – Resultados referente às simulações realizadas nos sistemas de testes IEEE da metodologia proposta considerando ramificações interferentes, sem reconfiguração de topologia e com perda de 1 TDR para instalação de 7 CPE's no sistema IEEE-13, 14 CPE's no sistema IEEE-37 e 41 CPE's no sistema 123.

Sistema	Metaheurística	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
IEEE-13	AG	5	5	0	241,5
	NBPSO	5	5	0	1442,51
IEEE-37	AG	20	20,33	0,51	3228,95
	NBPSO	20	20,67	0,81	18319,68
IEEE-123	AG	52	52,75	0,95	329265,95
	NBPSO	53	53,5	0,54	292880,64

Tabela 15 – Localização de TDR Críticos para alocação de modems PLC com o requisito de perda de 1 TDR.

Sistema	Localização de TDR's críticos Simulação 1	Localização de TDR's críticos Simulação 2
IEEE-13	632,671	632,671,684
IEEE-37	701,702,703,734,737	701,704,707,720,702,703,710,734,737
IEEE-123	13,18,57	13,18,57,81,84,86,103,108,35

Com a análise dos resultados obtidos para a perda de 1 TDR apresentados nesta Seção, percebe-se que o Algoritmo Genético apresenta melhor desempenho e maior potencial para gerar boas soluções para o problema de alocação de modems TDR's. Em especial, quando aumenta-se o número de nós no sistema e/ou é aumentado o número de CPE's a serem assistidos pela rede PLC verifica-se um melhor desempenho do AG tanto na capacidade de gerar soluções de menor custo quanto no tempo computacional gasto para atingir tais soluções.

Os testes realizados com os sistemas IEEE evidenciaram os benefícios de empregar uma modelagem flexível para o problema de alocação de modems PLC. De fato, o projetista de telecomunicações de acordo com seus objetivos e com as características da rede elétrica

Tabela 16 – Localização dos modems TDR para ambas simulações realizadas, considerando a existência de ramificações interferentes com a possibilidade de perda de 1 TDR, de acordo com as metaheurísticas utilizadas.

Sistema	Metaheurística	Localização de modems TDR
<b>Com 2 CPE's Instalados</b>		
IEEE-13	AG	632,671,692,684
	NBPSO	632,671,692,684
IEEE-37	AG	701,702,727,703,730,709, 708,733,734,737,738,711
	NBPSO	701,702,727,703,730,709, 708,733,734,737,738,711
IEEE-123	AG	8,13,18,21,25,26,53,54,57, 60,72,76,78,80,81,1,160
	NBPSO	8,13,18,21,23,25,31,54,57,60, 76,78,80,81,35,1,52,67,160
<b>Com Múltiplos CPE's Instalados</b>		
IEEE-13	AG	632,645,671,684,692
	NBPSO	632,645,671,684,692
IEEE-37	AG	701,705,713,714,704,707,720,706,702,727, 703,730,709,708,733,710,734,737,738,711
	NBPSO	701,705,713,714,704,707,720,706,702,727, 703,730,709,708,733,710,734,737,738,711
IEEE-123	AG	5,8,9,13,18,19,21,23,26,27,31,36,38,42, 44,49,51,53,54,57,60,62,64,65,68,69,72, 73,74,76,78,80,81,84,86,87,89,93,102,103, 105,106,108,109,110,113,35,1,197,101,135,160
	NBPSO	5,7,8,13,14,18,19,21,23,25,26,27,36,38,42,44,50, 51,53,54,57,60,62,64,65,68,69,72,73,74,76,78,80, 81,84,86,87,89,93,97,102,103,105,106,108,109, 110,112,35,1,197,135,160

eleita para comunicação de dados, avalia as diferentes relações custo-benefício, e elege qual será sua estratégia para alocação dos repetidores. Opta-se por realizar o projeto de comunicação PLC contemplando às reconfigurações topológicas da rede elétrica ou a perda de 1 TDR qualquer sem prejuízo à comunicação de dados PLC.

#### 5.2.4 Análise Comparativa dos Resultados dos Sistemas de Teste IEEE

A Figura 30 ilustra o resultado da aplicação da metodologia no sistema de testes IEEE de 13 barras para a simulação 1, onde apenas 2 CPE's são projetados. Nesta figura, apresenta-se os melhores resultados obtidos com a configuração básica, considerando a reconfiguração topológica e a perda de 1 TDR qualquer sem prejuízo à comunicação. A Tabela 17, além de apresentar os melhores valores obtidos como soluções para o problema, apresenta também o desvio padrão e o tempo computacional médio de execução do algoritmo. Observa-se que o desvio padrão para todas as simulações no sistema IEEE 13

barras em ambos algoritmos testados, tanto para AG quanto o NBPSO, foram iguais a zero, sugerindo que as soluções encontradas possam ser ótimos globais. Ao observar a quantidade de TDR alocado, repara-se que para contemplar a reconfiguração topológica o sistema IEEE 13 barras acrescentou mais 1 TDR à comunicação. Em relação a perda de 1 TDR foram necessários 4 modems repetidores para que atenda a este quesito de resiliência, mesmo que 1 TDR se perca, ou seja, torne-se indisponível, a comunicação de dados não é interrompida ou mesmo prejudicada. Com relação ao tempo médio de execução dos algoritmos, o NBPSO apresentou melhores resultados quanto a configuração básica e quando testado a reconfiguração topológica. Quando compara-se o tempo de execução dos testes para perda de 1 TDR, os valores aumentam, apresentando assim um melhor desempenho o AG.

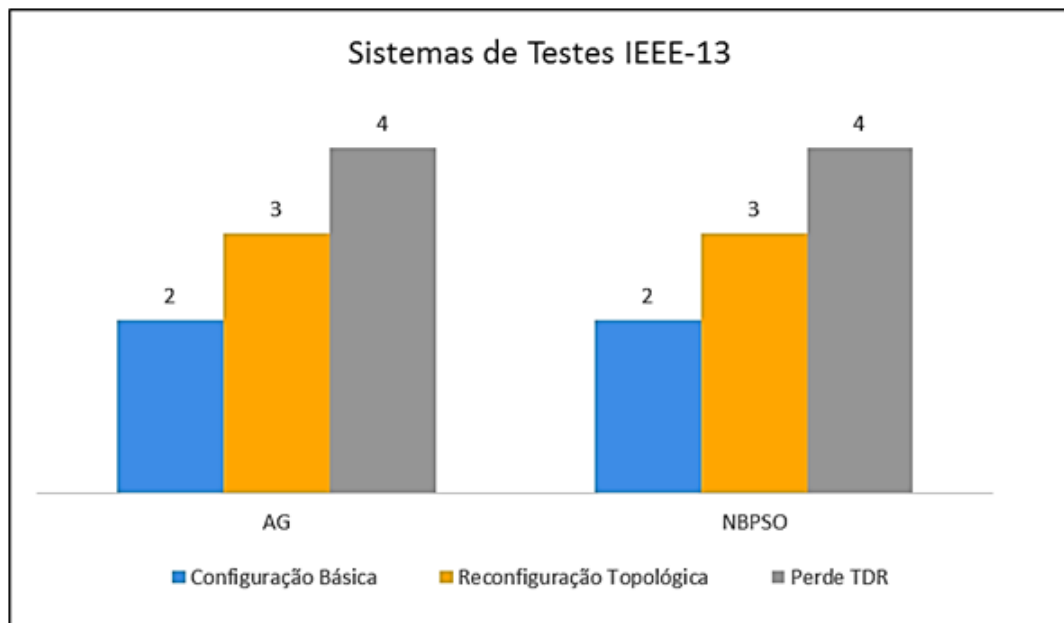


Figura 30 – Resultado dos testes para o sistema IEEE1 3 barras para atender 2 CPE's.

Tabela 17 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 13 barras para antender 2 CPE's.

Simulação 1							
MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio	MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio
AG	2	0	23	NBPSO	2	0	7
AG	3	0	46	NBPSO	3	0	15
AG	4	0	91	NBPSO	4	0	154

A fim de testar a metodologia propôs-se instalar CPE's em todos os nós finais, que para o sistema IEEE 13 barras foram instalados 7 CPE's. A Figura 31 mostra a melhor solução encontrada para a configuração básica, para a reconfiguração da topologia e para a perda de 1 TDR. Observa-se que ao incluir a reconfiguração topológica fez-se necessário

o aumento de 2 TDR's para que não haja prejuízo à comunicação de dados. Atenta-se para o aumento significativo dos tempos de execução computacional médio. A medida que aumenta-se a quantidade de CPE's projetados, é aumentado o tempo de execução médio de ambos algoritmos. O AG mostra-se mais eficaz por chegar nas mesmas soluções com o tempo computacional médio mais interessante, como mostra a Tabela 18.

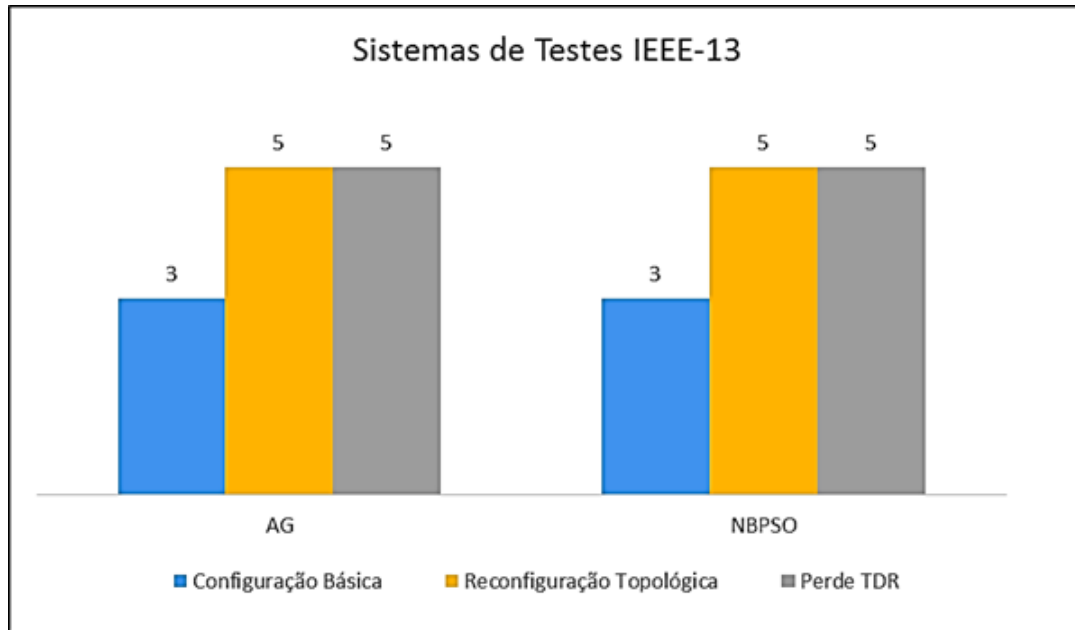


Figura 31 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 13 barras para atender 7 CPE's.

Tabela 18 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 13 barras para atender 7 CPE's.

Simulação 2							
MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio	MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio
AG	3	0	57	NBPSO	3	0	229
AG	5	0	118	NBPSO	5	0	476
AG	5	0	241	NBPSO	5	0	1442

A Figura 32 expõe os resultados do sistema de testes IEEE 37 barras quando simulado para atendimento a 2 CPE's. Observa-se que para configuração básica foram necessários alocação de 8 modems TDR's em ambos algoritmos testados. Quando propõe-se alterações topológicas da rede elétrica o algoritmo faz a alocação de mais 2 modems TDR. Ao analisar a perda de 1 TDR qualquer sem prejuízo à comunicação foram alocados 12 modems TDR's. Em relação aos tempos computacionais de execução a Tabela 19 mostra um desempenho melhor do AG em relação ao NBPSO. Ao executar o algoritmo percebe-se que em alguns casos não há desvio padrão, seu valor é zero. Este valor de desvio padrão sugere que a solução encontrada seja uma solução ótima como observa-se em ambos algoritmos na configuração básica e a perda de 1 TDR.

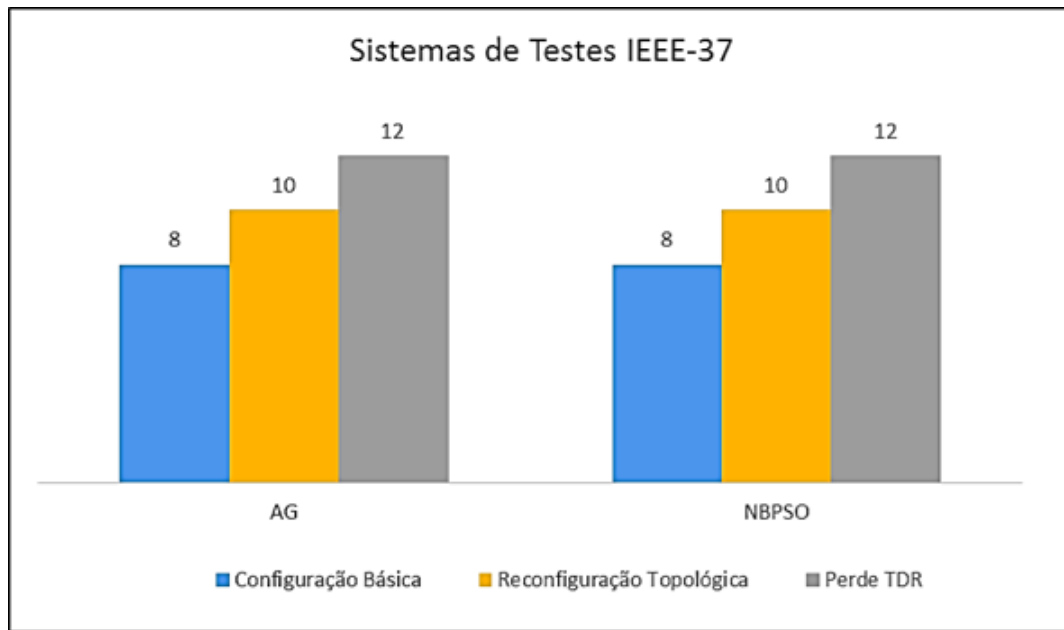


Figura 32 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 37 barras para atender 2 CPE's.

Tabela 19 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 37 barras para atender 2 CPE's.

Simulação 1							
MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio	MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio
AG	8	0	35	NBPSO	8	0	169
AG	10	0,4	68	NBPSO	10	0,58	333
AG	12	0	443	NBPSO	12	0	1510

Ao instalar CPE's em todos os nós finais, para o sistema IEEE de 37 barras, no total de 14 CPE's instalados, a quantidade de modems alocados aumenta como observa-se na Figura 33. Para a configuração básica necessitou-se de 12 modems TDR's para estabelecer comunicação conforme a metodologia. Já para considerar a reconfiguração topológica da rede o AG apresentou melhor desempenho, a sua melhor solução foi 2 modems abaixo do NBPSO com o tempo computacional mais interessante, mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 37 barras para atender 14 CPE's.

Simulação 2							
MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio	MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio
AG	12	0	221	NBPSO	12	0	886
AG	12	0	406	NBPSO	14	0,5	1750
AG	20	0,5	3228	NBPSO	20	0,8	18319

Os resultados obtidos para o sistema de testes IEEE de 123 barras para atendimento a 2 CPE's pode ser observado na Figura 34. O AG apresentou melhor desempenho para este sistema, o algoritmo alcançou melhores soluções em tempos computacionais mais

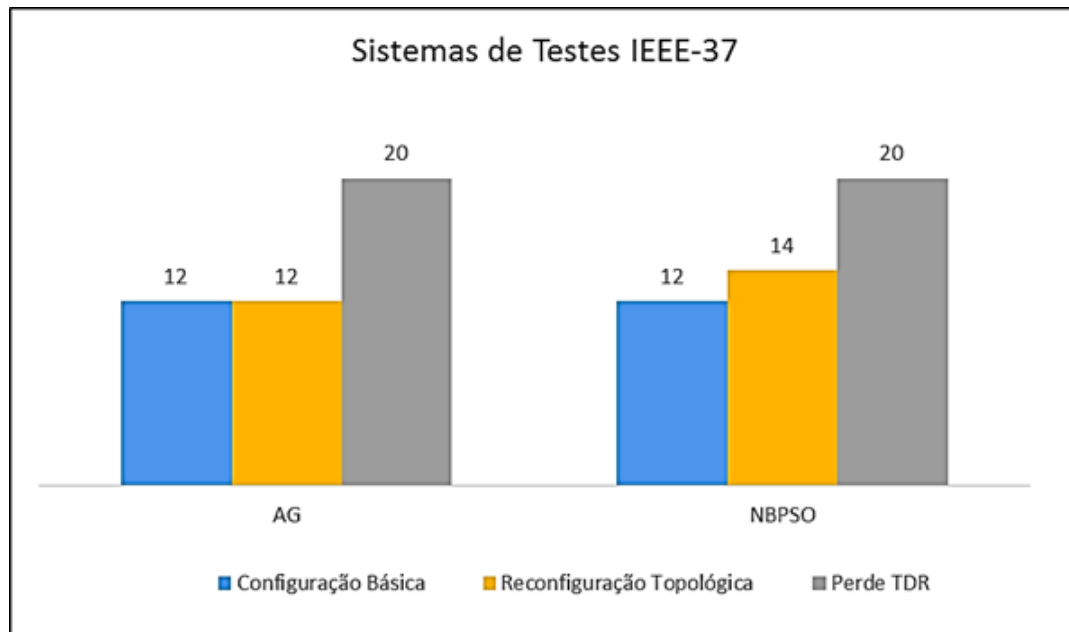


Figura 33 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 37 barras para atender 14 CPE's.

atrativos, como apresentado na Tabela 21. Para a configuração básica o AG propôs a alocação de 9 modems TDR, considerando a reconfiguração topológica o AG propôs 11 TDR's e para atender o quesito perda de 1TDR qualquer sem prejuízo à comunicação o algoritmo propõe alocação de 17 modems.

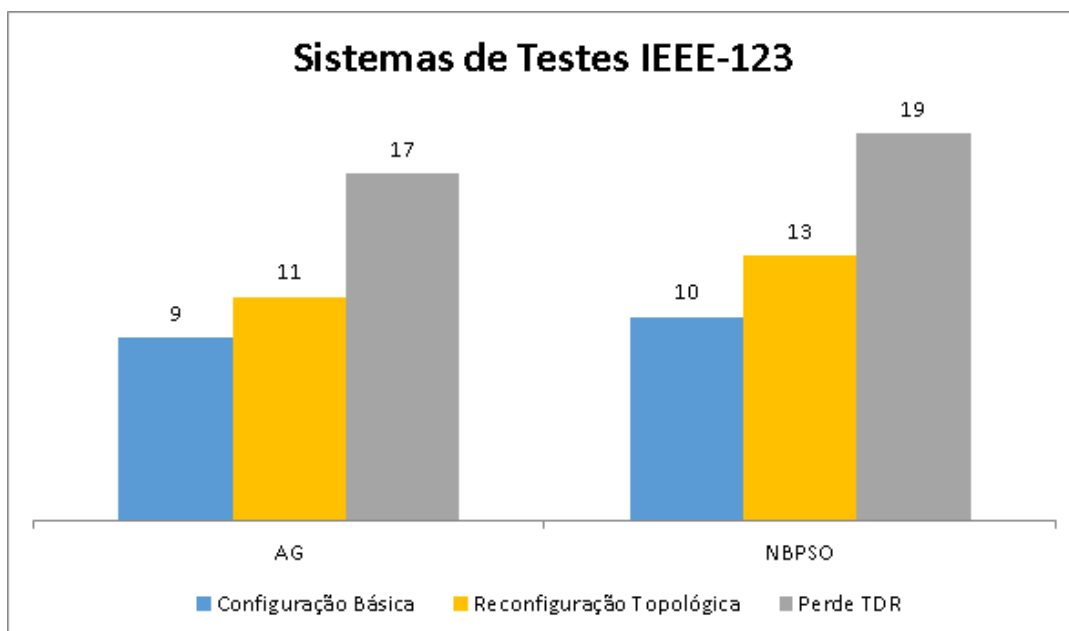


Figura 34 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 123 barras para atender 2 CPE's.

Ao realizar as simulações com CPE's instalados em todos os nós finais, que para o sistema de testes IEEE 123 barras foram instalados 41 CPE's, os resultados podem ser comparados na Figura 35. Observa-se um melhor desempenho do AG em relação ao NBPSO quando comparados as soluções encontradas. Na configuração básica, ambos



Tabela 21 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 123 barras para atender 2 CPE's.

Simulação 1							
MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio	MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio
AG	9	0,5	406	NBPSO	10	1,7	675
AG	11	1,2	743	NBPSO	13	1,5	1436
AG	17	0	1706	NBPSO	19	1,1	23302

algoritmos sugerem alocação de 27 modems repetidores como solução do problema, no entanto o AG possui tempos computacionais mais atrativos. Quanto a reconfiguração da topologia o AG chega a uma solução de 29 modems TDR quanto o NBPSO alcança como sua melhor solução 35 modems repetidores. Ao analisar a perda de 1 TDR o AG mantém seu melhor desempenho sobre o NBPSO propondo alocação de 52 modems TDR. Os tempos computacionais médios são expostos na Tabela 22 e observa-se um melhor desempenho do AG sobre o desempenho do NBPSO em todos os testes sugeridos.

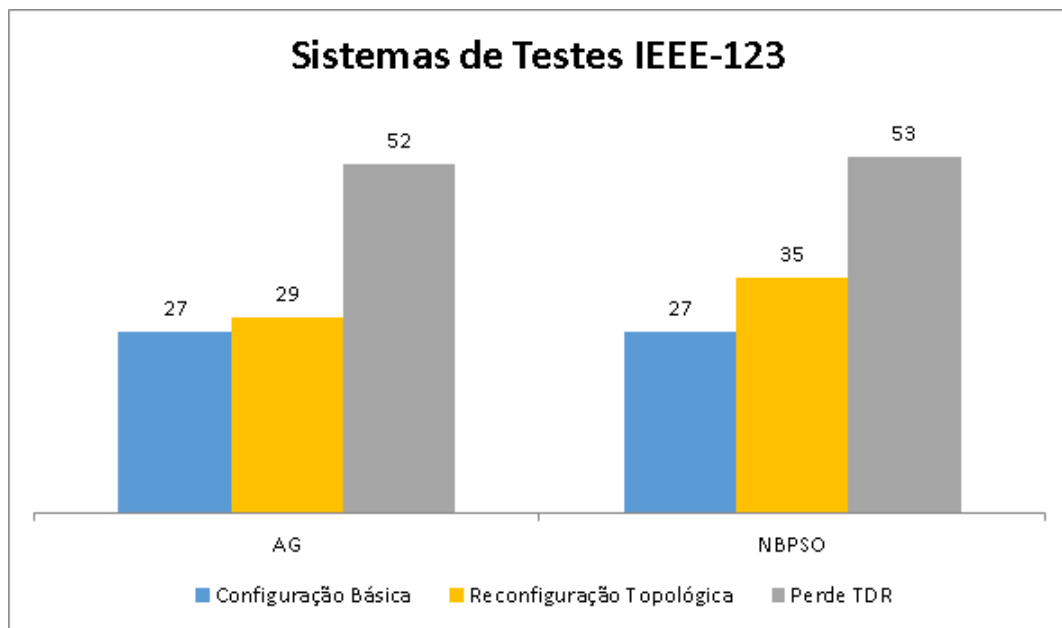


Figura 35 – Resultado dos testes para o sistema IEEE 123 barras para atender 41 CPE's.

Tabela 22 – Resultado da aplicação da metodologia para o sistema de testes IEEE 123 barras para atender 41 CPE's.

Simulação 2							
MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio	MH	Mel. Solução	DP	Tempo Médio
AG	27	0,6	5084	NBPSO	27	0,5	11663
AG	29	1,4	11504	NBPSO	35	1,1	21776
AG	52	1	329265	NBPSO	53	0,5	292880

### 5.3 Aplicação da Metodologia em Redes Elétricas Reais

Este estudo baseia-se em uma topologia de rede real que interliga 3 poços produtores de petróleo à uma estação coletora SM8 utilizando a rede elétrica de média tensão (13,8kV) como meio de acesso, conforme ilustrado na Figura 9. Esta rede é localizada em Rio Preto, no município de São Mateus, região Norte do estado do Espírito Santo.

Os poços produtores de petróleo são dotados de sistemas de automação, interligados aos processos de produção, e a uma câmera que faz parte de um sistema de vigilância patrimonial. Com isso, a demanda de tráfego é composta por dados de automação e de *video streaming* gerados pela câmera. Com isso a comunicação de dados BPL nesta rede MT utiliza-se de 3 repetidores TDR's alocados conforme estudos anteriores, baseados na distância de cobertura e no desempenho dos modems diante das derivações existentes ao longo da rede de MT [Castor et al. 2016], [Castor 2016]. A topologia utilizada nestes estudos é ilustrada na Figura 36.

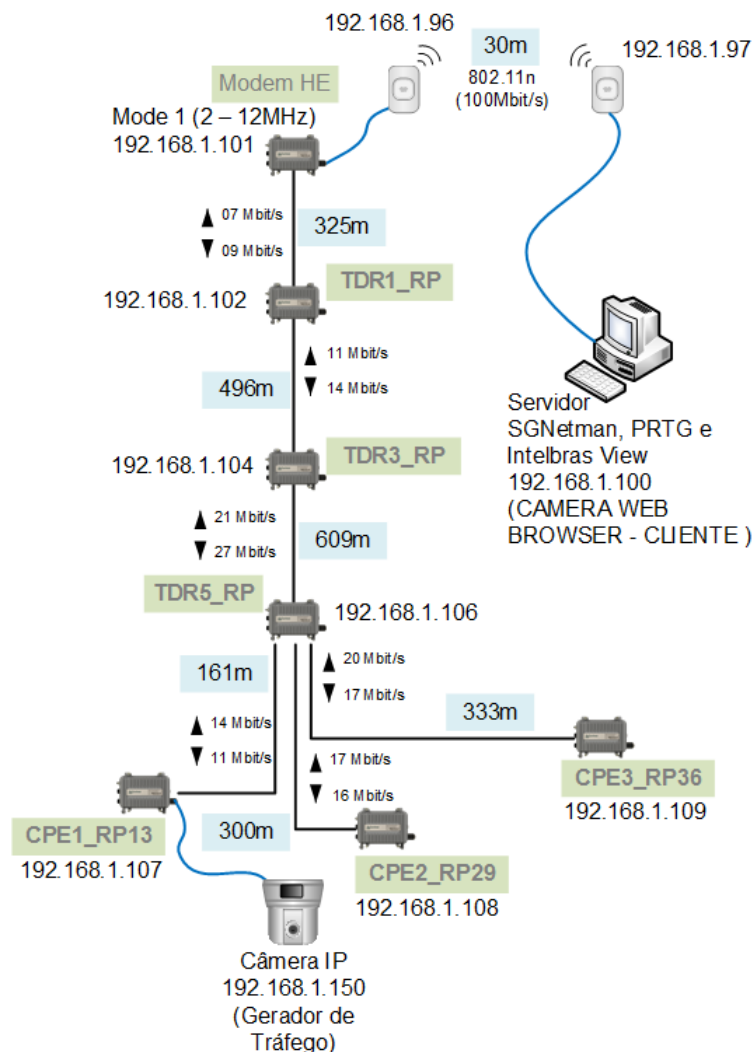


Figura 36 – Topologia da rede *Broadband PowerLine* aplicada nos testes de campo de estudos anteriores. Fonte: [Castor et al. 2016].

O algoritmo proposto foi testado nesta rede real de MT localizada em Rio Preto (RP). A rede elétrica MT Rio Preto (RP) possui 1,63 km de extensão, o modem mestre HE está instalado junto a estação coletora SM8 e os CPE's são instalados junto a 3 poços produtores de petróleo.

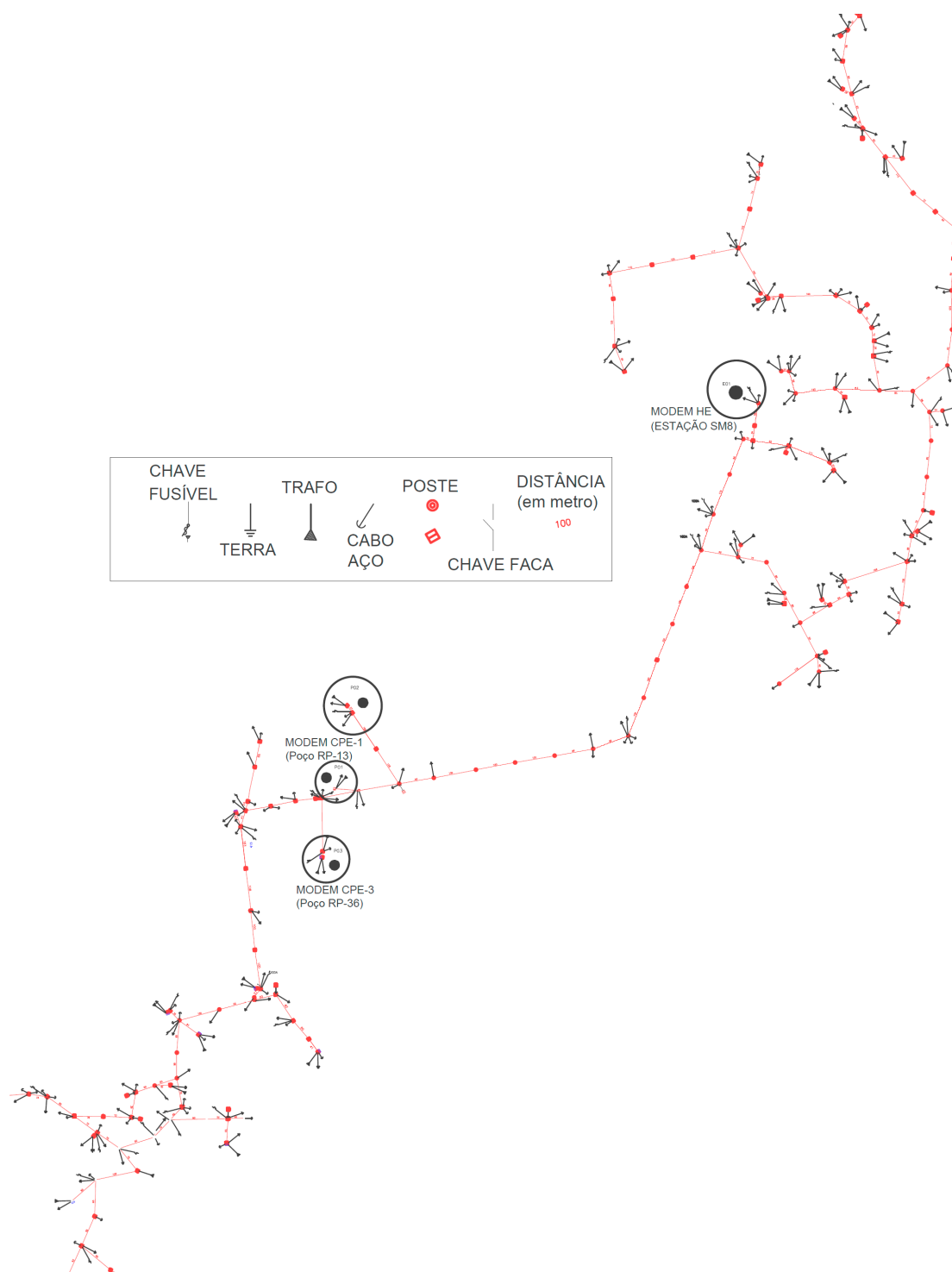


Figura 37 – Diagrama ilustrativo contendo informações técnicas necessárias para o projeto de alocação de repetidores para comunicação PLC nas redes elétricas de média tensão.

Ao aplicar o algoritmo de alocação de modems repetidores à rede elétrica MT

RP, conforme a metodologia proposta neste trabalho, obteve-se os mesmos resultados de estudos preliminares [Castor 2016]. A Tabela 23 mostra que a quantidade de repetidores alocados para comunicação de dados através da rede elétrica, são de 3 modems TDR's para atender à 3 CPE's localizados junto aos poços produtores de petróleo, considerando os locais da rede elétrica onde há presença de ramificações destrutivas.

Quando aplica-se o algoritmo que contempla a perda de 1 TDR qualquer sem prejuízo a comunicação de dados, a rede elétrica RP aloca 6 modems TDR's para que se qualquer um destes repetidores tornar-se indisponível, a comunicação de dados mantém sua capacidade de comunicação com o mesmo nível de qualidade, conforme apresentado na Tabela 23. Verifica-se que a rede elétrica RP não apresentou TDR's críticos, devido sua característica física (pequenas distâncias entre os postes).

Tabela 23 – Resultado da metodologia aplicada ao sistema RP projetado para solucionar o problema de alocação de modems PLC.

Sistema	Metaheurísticas	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
Formulação Básica Sem Reconfiguração Topológica					
RP	AG	3	3	0	485,14
	NBPSO	3	3,25	0,5	1597,0
Critério de Perda de 1 TDR					
RP	AG	6	6,5	0,57	1407,87
	NBPSO	6	6,25	0,5	6454,5

O gráfico da Figura 38 apresenta a convergência do Algoritmo genético na metodologia proposta na rede elétrica RP. Observa-se que até a iteração de número 26 o algoritmo converge para melhores soluções e após esta iteração permanece inalterado até que seja satisfeito o critério de parada (500 iterações).

A melhor solução encontrada pelo algoritmo de alocação de repetidores para a rede elétrica RP foi de 3 repetidores para atendimento à 3 CPE's, conforme previu a alocação experimental em campo, segundo as características previstas levantadas por [Castor 2016] e [Oliveira et al. 2016].

Por fim, este trabalho propõe uma alocação estratégica de modems PLC em uma rede de MT, contínua, de aproximadamente 10 km, localizada em Rio Preto do Oeste no município de São Mateus, estado do Espírito Santo, que num futuro próximo será utilizada como meio de transporte para comunicação de dados banda larga, automação e vigilância patrimonial de 6 poços produtores de petróleo *onshore*.

O projeto da comunicação PLC através da rede elétrica de MT em Rio Preto do Oeste (RPO) é uma expansão da rede elétrica RP, já existente e operando em campo, onde o modem HE está instalado na estação coletora SM08 e deseja-se instalar modems CPE's para cada poço de petróleo. A topologia física da rede elétrica RPO está ilustrado

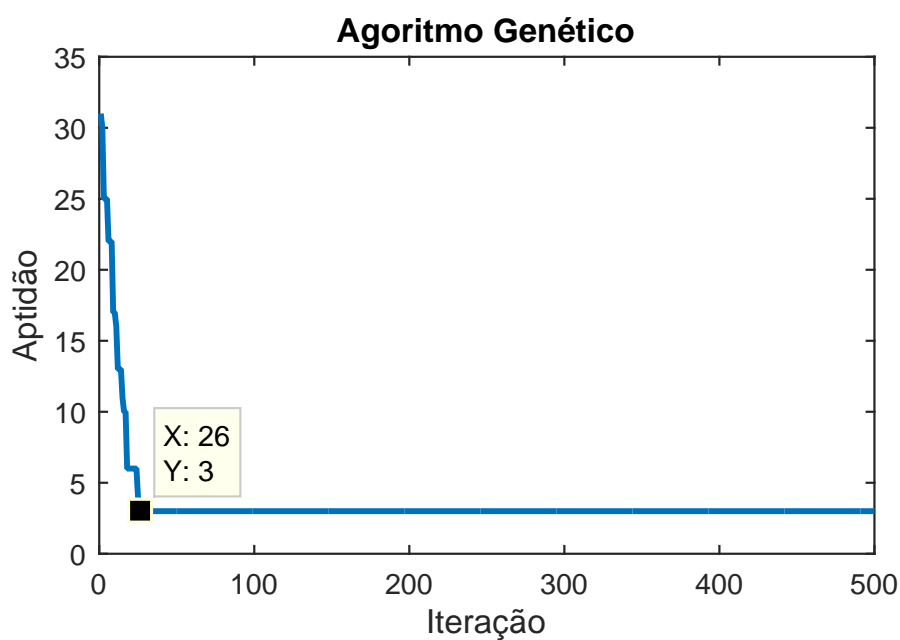


Figura 38 – Gráfico de convergência do Algoritmo Genético para a rede elétrica RP com 500 iterações.

na Figura 39. De fato, o conhecimento da planta da rede elétrica e de todas as informações sobre posteamento, distâncias entre todos os postes, dados da topologia física da rede elétrica são de extrema importância para aplicação da metodologia.

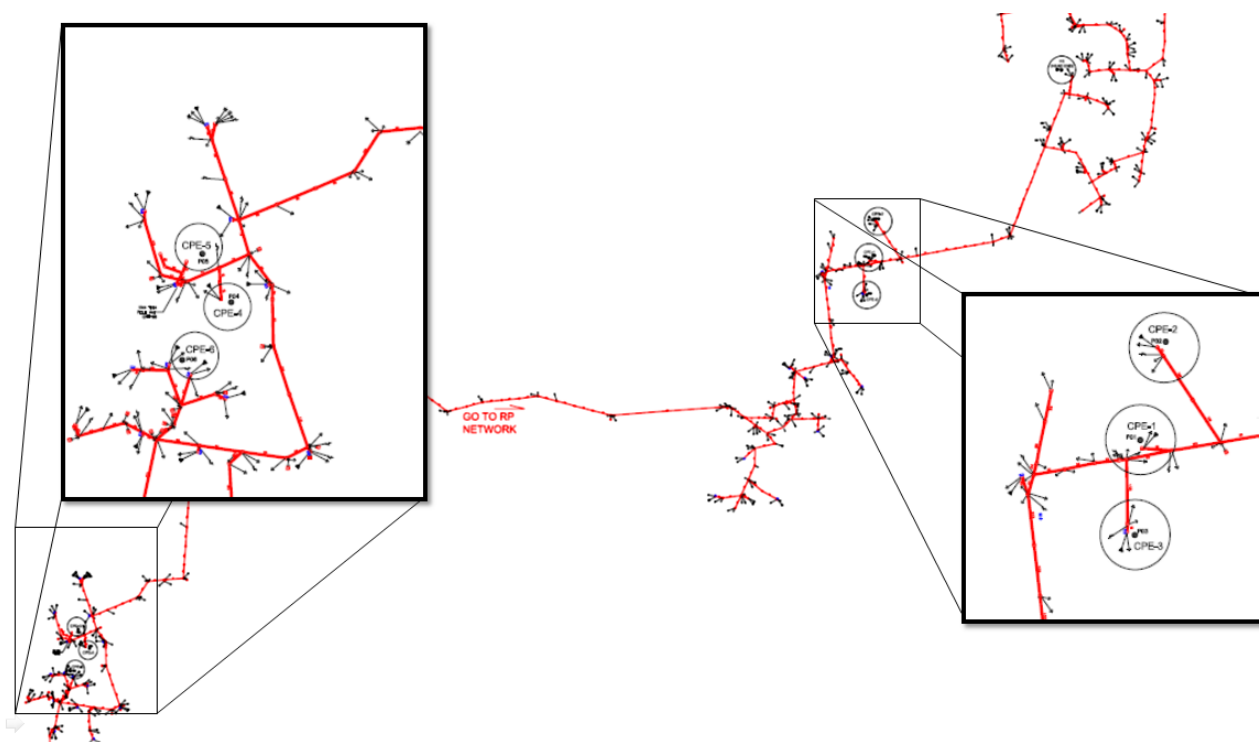


Figura 39 – Rede elétrica de MT RPO.

As redes de distribuição de média tensão podem ser públicas, ou seja, compartilhada

Tabela 24 – Resultado da metodologia aplicada ao sistema RPO projetado para solucionar o problema de alocação de modems PLC.

Sistema	Metaheurísticas	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio(s)
<b>Formulação Básica Sem Reconfiguração Topológica</b>					
RPO	AG	19	19,25	0,5	1236,85
	NBPSO	20	20,25	0,5	11918,62
<b>Critério de Perda de 1 TDR</b>					
RPO	AG	40	42	2	162964,21
	NBPSO	51	51,5	0,57	423893,77

entre vários assinantes ou privadas, instaladas para atendimento a um ou a poucos usuários. As redes públicas têm sua capilaridade elevada para atendimento a diversos usuários e também detém de uma maior capacidade de alteração na sua topologia física sendo consideravelmente maior que uma rede privada. A rede de distribuição estudada neste trabalho é uma rede privada, que foi instalada para atendimento à poucos usuários e com isso é pouco capilarizada e não apresenta vários cenários topológicos reconfiguráveis. Como a metodologia deste trabalho contempla alterações de cenários topológicos da rede elétrica, logo assim que novas cargas forem inseridas à esta rede e alterar sua topologia o algoritmo pode ser novamente aplicado contemplando este novo cenário.

Os resultados preliminares do problema de alocação de modems PLC são apresentados na Tabela 24. O algoritmo usado na metodologia sugere em sua melhor solução a alocação de 19 modems para a rede elétrica RPO. Quanto ao requisito de perda de 1 TDR, a algoritmo propõe a alocação de 40 repetidores. O número alto de repetidores pode ser pontuado pelo fato da rede analisada no estudo ser um pouco capilarizada, e os modems escravos estarem instalados a uma longa distância em relação ao HE.

Assim como nos testes do sistema IEEE, o NBPSO atingiu resultados menos satisfatórios em relação ao AG. Repare que o AG encontrou soluções mais viáveis e seu tempo computacional de execução mostrou-se mais adequado em relação ao NBPSO. Sendo assim, o sugere-se que NBPSO necessite de ajustes de seus parâmetros para melhor convergência de suas soluções.

A Figura 40 mostra como devem ser alocados os modems repetidores para promover comunicação de dados PLC e atender a todos os poços de petróleo conforme o algoritmo deste trabalho.

O gráfico apresentado na Figura 41 apresenta a convergência do Algoritmo Genético em 500 gerações. A melhor solução encontrada foi 19 repetidores na 86ª iteração.

Estudos anteriores [Anatory e Theethayi 2010] avaliaram sistemas PLC em banda estreita e constataram que sistemas NB-PLC possuem capacidade de transmissão em torno de 1 Mbps em trechos que alcançam distâncias de 1 km sem necessidade de repetição.

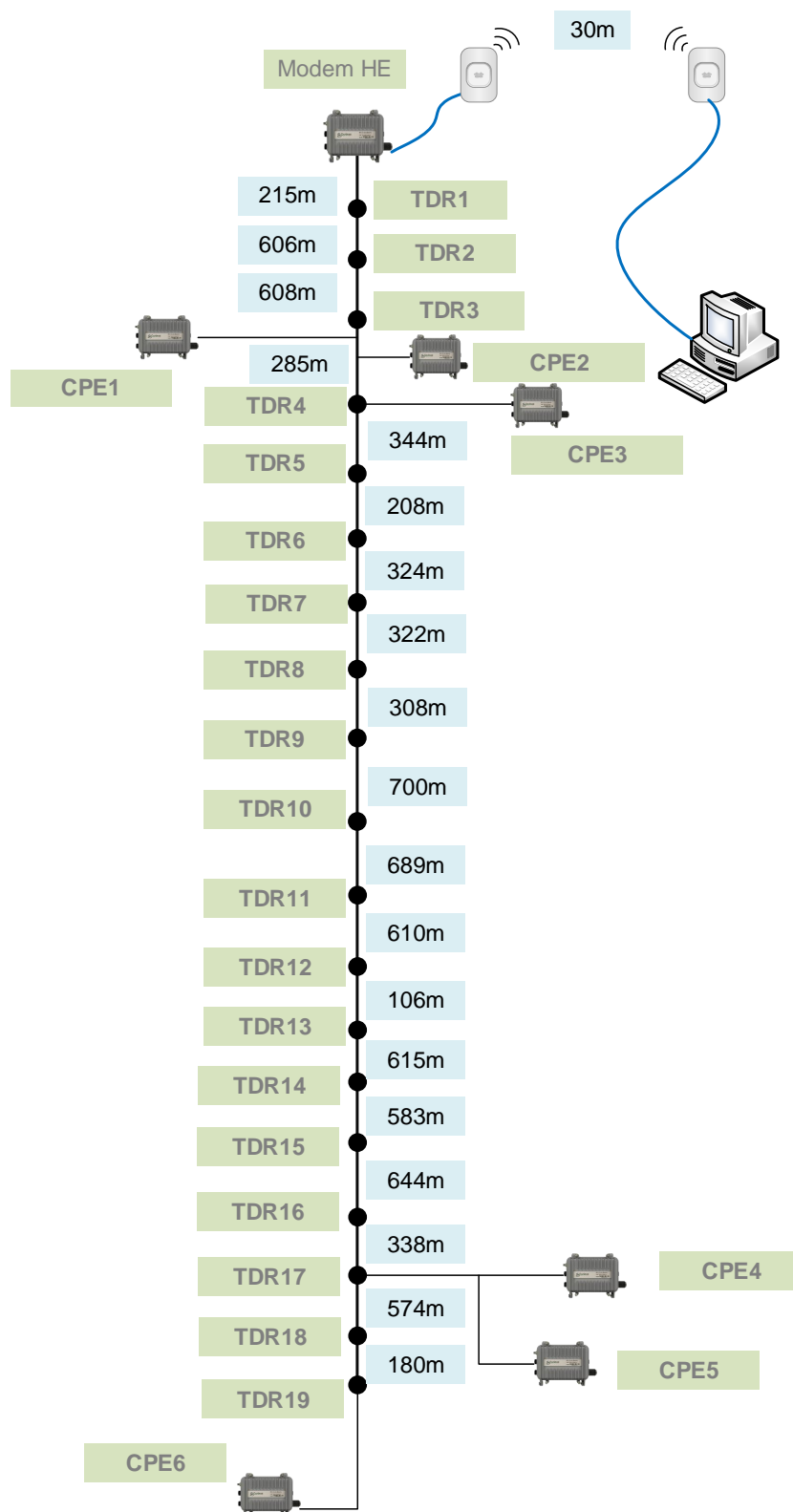


Figura 40 – Topologia proposta para o problema de alocação de modems na rede elétrica RPO de acordo com a metodologia proposta.

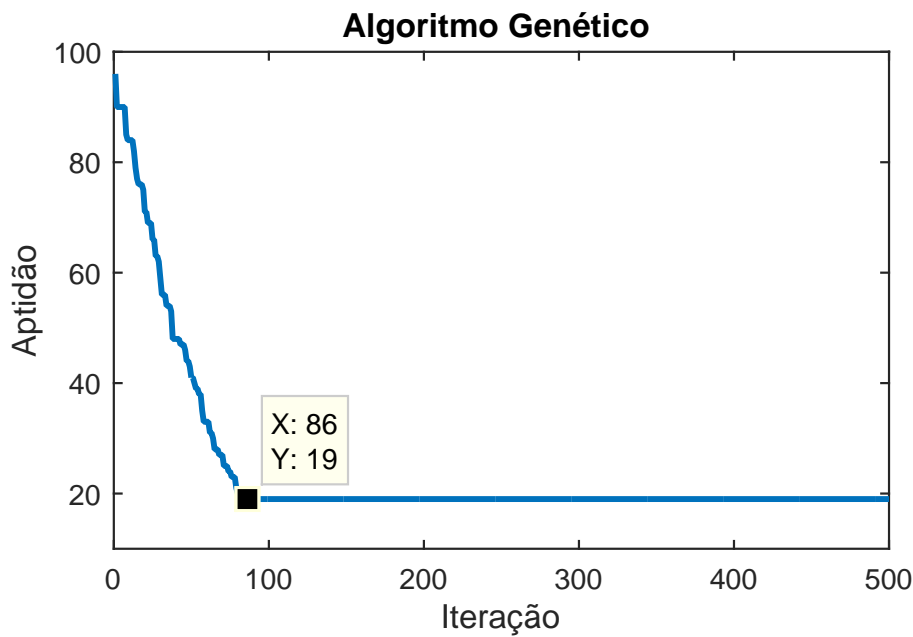


Figura 41 – Gráfico de convergência do Algoritmo Genético para a rede elétrica RPO com 500 iterações.

Portanto, Castor [Castor et al. 2016] através de experimentos em campo ensaiou distâncias de 1 km entre trechos que não continham ramificações interferentes na rede elétrica de MT RP e obteve resultados que mostraram um tráfego *Ethernet* de 3 Mbps composto por dados de automação e imagens de alta definição transportados em tempo real aos respectivos servidores, sem erros.

Portanto, com o propósito de alocar a mínima quantidade de repetidores para a rede elétrica RPO, o algoritmo de alocação de TDR foi adaptado para alocar repetidores com 1 km de distâncias entre eles quando o trecho em questão não possuir ramificações interferentes e 500 m de distância entre modems quando o trecho analisado possuir derivações que introduzem interferências destrutivas à comunicação, com o objetivo de minimizar ainda mais os custos de implementação da tecnologia de transmissão de dados via rede elétrica.

Os resultados obtidos com as novas distâncias são apresentados na Tabela 25. Verifica-se que a quantidade de modems repetidores necessários à comunicação reduziu seu número de 19 para 14 modems TDR's, promovendo uma economia de 5 modems TDR's com os novos critérios de distâncias entre os equipamentos PLC adotados.

Ao investigar a possibilidade de perder de 1 TDR, o algoritmo propôs a alocação de 28 modems a fim de manter a comunicação de dados de acordo com os novos parâmetros eleitos no planejamento do projeto.

Quando compara-se o desempenho das metaheurísticas propostas para buscar soluções mais atrativas, observa-se que o AG apresentou melhor desempenho em relação ao



Tabela 25 – Quantidade de modems TDR's alocados no sistema RPO em atendimento à 6 CPE's com adaptação das distâncias de 1km para trechos sem ramificações interferentes e 500m para trecho que possuem ramificações interferentes.

Sistema	Metaheurísticas	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
Formulação Básica Sem Reconfiguração Topológica					
RPO - 2	AG	14	14	0	1266,6
	NBPSO	21	21,5	1	10145,4
Critério de Perda de 1 TDR					
RPO - 2	AG	28	29	1,41	182151,3
	NBPSO	32	32,25	0,5	598691,47

NBPSO. O tempo computacional muito elevado gasto pelo NBPSO não foi nada atrativo e ainda assim apresentou soluções de menor qualidade em relação ao AG. Estima-se que o NBPSO tenha identificado ótimos locais como sendo a melhor solução para o problema.

A Figura 42 apresenta a disposição da rede de comunicação BPL proposta para a rede elétrica MT RPO quanto a localização de todos os repetidores sugeridos pelo algoritmo deste trabalho, agora com os novos parâmetros de distância entre os equipamentos PLC.

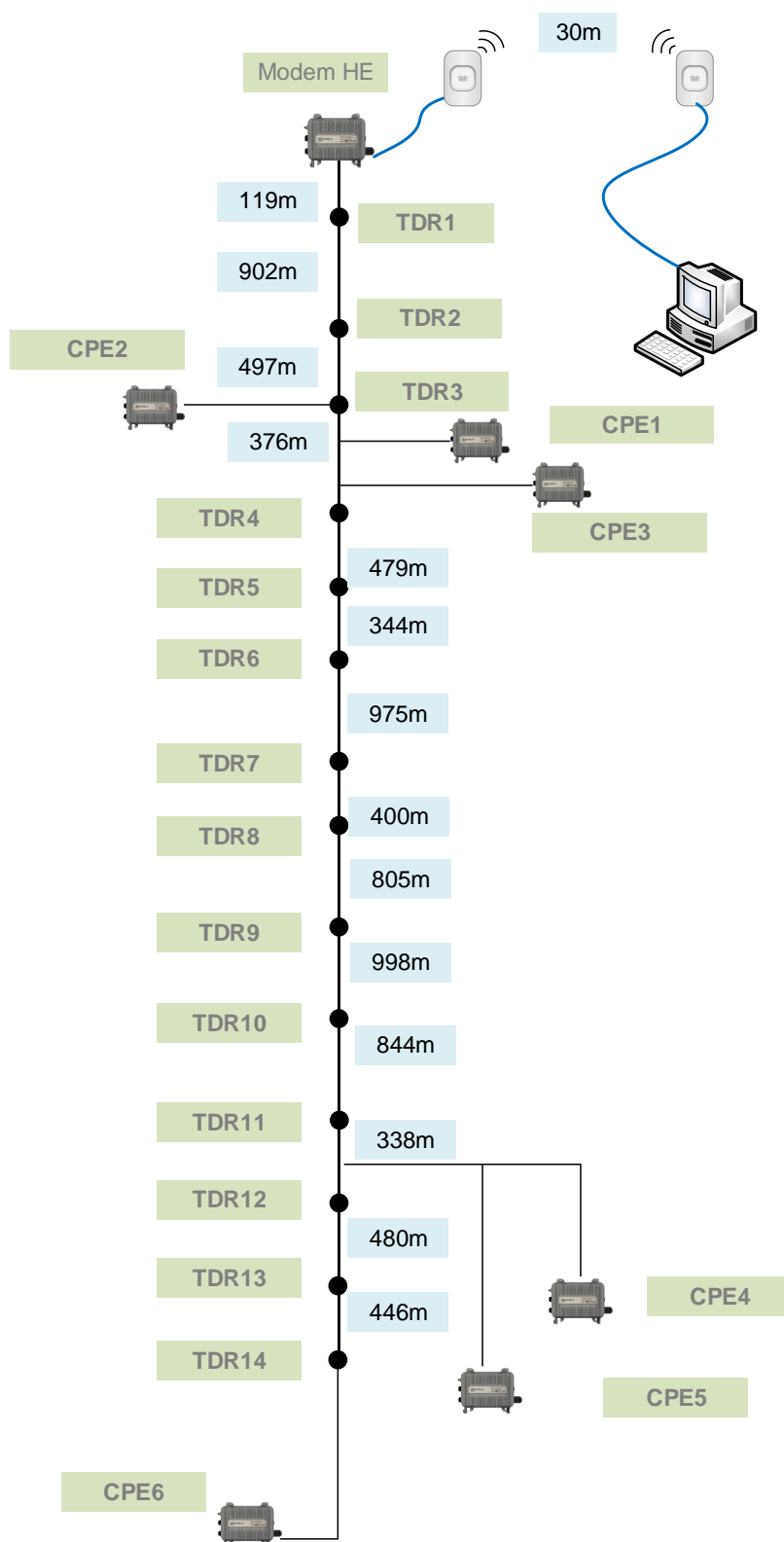


Figura 42 – Topologia proposta para o problema de alocação de modems na rede elétrica RPO adotando novas distâncias entre os equipamentos PLC.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

O cenário financeiro mundial demanda sistematicamente por soluções que minimizem os custos e maximizem lucros, sem prejuízo à qualidade de produtos ou serviços prestados por determinados setores. A tecnologia de comunicação de dados via rede elétrica PLC (*Power Line Communications*) é vista como uma alternativa de minimizadora de custos já que promove comunicação a altas taxas de transmissão em um sistema com cabeamento já instalado e que compartilha comunicação e condução de energia elétrica.

A determinação da quantidade, bem como da localização dos pontos de alocação de repetidores ao longo da comunicação PLC são de suma importância para minimizar seus custos de implantação. Neste trabalho foram apresentadas metodologias para alocação de repetidores em redes PLC de banda larga. O conhecimento a respeito da rede elétrica, seu posteamento e como suas ramificações interferem na comunicação são de fundamental importância para adoção de uma correta distância entre os repetidores, para que de fato seja alocado a mínima quantidade destes.

As redes elétricas de média tensão são dinâmicas e constantemente sofrem alterações em sua topologia, seja por aumento de carga, manutenção preditiva, melhoramento e/ou expansão da rede. Como consequência ocorrem interferências que podem interferir destrutivamente na comunicação. Estes fenômenos influenciam diretamente na qualidade de propagação do sinal PLC sobre a rede elétrica. Diante disso, apresentou-se um algoritmo de alocação de repetidores que considera os vários cenários topológicos que podem ser assumidos pela rede elétrica, a presença de ramificações interferentes ao longo da linha principal, mas que também possibilita o planejamento da comunicação PLC para que em sua operação um TDR qualquer possa tornar-se indisponível sem prejuízo à comunicação PLC.

O problema de alocação de repetidores foi aqui tratado como um problema de otimização combinatória e formulado de uma maneira a considerar os interesses do projetista durante sua fase de planejamento. Para a solução deste problema de alocação foram propostas metodologias que utilizaram duas metaheurísticas como método de busca de soluções ótimas, quais sejam o algoritmo Genético AG e o *New Binary Particle Swarm Optimization* NBPSO.

O Algoritmo Genético mostrou-se eficaz na obtenção de boas soluções para o problema. A solução inicial foi gerada de forma aleatória e o algoritmo AG realizou buscas de melhores soluções no seu processo evolutivo com um tempo computacional menor em relação ao NBPSO. Já o NBPSO é populacional que inspira-se no comportamento de coletivo dos indivíduos na natureza. Este mostrou-se uma boa alternativa para buscar soluções em

redes de pequeno porte. Quando aumenta-se a quantidade de nós e equipamentos escravos instalados nas redes de comunicação, apresentou um tempo computacional de execução bem superior ao AG, além de piores soluções.

A metodologia proposta apresentou bons resultados na alocação de repetidores em uma rede de média tensão real de aproximadamente 10 km de extensão. A partir do projeto apresentado, pretende-se em um futuro próximo implantar a tecnologia PLC para videomonitoramento, supervisão e controle de 6 poços de petróleo localizados em São Mateus, norte do estado do Espírito Santo. A proposta designou 14 repetidores como o número mínimo para atendimento dos poços. Por ser uma rede elétrica privada, sua topologia não possui muitos cenários de reconfigurações, porém o planejador tem a opção, caso este sistema sofra alterações em sua topologia, de rapidamente reavaliar e recalcular através da metodologia um novo modelo para alocação dos equipamentos repetidores.

Para continuação desta pesquisa, sugere-se a proposição de uma heurística construtiva para definição de uma solução inicial a fim de que os algoritmos de busca obtenham soluções de qualidade em tempos computacionais mais atraentes. A realização de simulações de modo a explorar outras configurações admitidas pela metodologia, a investigação do emprego de outras metaheurísticas para solução do problema abordado, bem como a combinação de heurísticas construtivas e/ou metaheurísticas híbridas, também deverão ser objetos de estudos futuros.

# Referências

AHOLA, J. et al. Applicability of power-line communications to data transfer of on-line condition monitoring of electrical drives. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

ANATORY, J.; THEETHAYI, N. *Broadband Power-line Communications Systems: Theory & Applications*. [S.l.]: wit press, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 23, 27, 28, 29, 75 e 92.

ANATORY, J. et al. Broadband power line communications: The factors influencing wave propagations in the medium voltage lines. In: IEEE. *Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC'07. IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2007. p. 127–132. Citado na página 27.

ANEEL. Agência nacional de energia elétrica. *Informações técnicas para consumidores*. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/index.cfm>. [S.l.], 2015. Citado na página 27.

BANKS, A.; VINCENT, J.; ANYAKOHA, C. A review of particle swarm optimization. Part i: background and development. *Natural Computing*, Springer, v. 6, n. 4, p. 467–484, 2007. Citado na página 38.

CANO, C. et al. State of the art in power line communications: From the applications to the medium. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 34, n. 7, p. 1935–1952, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 24, 27, 28 e 29.

CASTOR, L. *A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Dados em Redes Smart Grid*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. Citado 7 vezes nas páginas 13, 25, 28, 29, 43, 88 e 90.

CASTOR, L. R. et al. The Smart Grid Concept in Oil & Gas Industries by a Field Trial of Data Communication in MV Power Lines. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 15, n. 2, p. 81–92, 2016. Citado 14 vezes nas páginas 13, 14, 22, 24, 25, 27, 28, 43, 44, 45, 47, 75, 88 e 94.

CASTOR, L. R. et al. Experimental investigation of broadband power line communication modems for onshore oil & gas industry: A preliminary analysis. In: IEEE. *Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2014 18th IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2014. p. 244–248. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 47.

CASTOR, L. R. M.; SILVA, J. A. da; SEGATTO, M. E. Medium voltage overhead power-line as a smart distribution grid for Onshore Oil & Gas industries automation and broadband data transport. In: IEEE. *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*. [S.l.], 2015. p. 641–645. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 28.

COLEY, D. A. *An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers*. [S.l.]: World Scientific Publishing Co Inc, 1999. Citado na página 35.

- CORINEX. *User guide. Manual Técnico do modem CXP-HDA-GWYC*. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 47, 53 e 75.
- DEZAN, T. L. et al. Comparação das técnicas de modulação multiportadoras aplicadasas comunicações via rede elétrica. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT*, v. 2004, 2004. Citado na página 25.
- DOSTERT, K. Telecommunications over the power distribution grid—possibilities and limitations. *IIR-Powerline*, v. 6, p. 97, 1997. Citado na página 27.
- DOSTERT, K. *Powerline communications*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- EDEV, C.; GROUP, E. et al. *First Draft of the OPERA Specification Version 2*. [S.l.], 2007. Citado 6 vezes nas páginas 22, 24, 28, 29, 30 e 31.
- GOLDBERG, D. E.; HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and machine learning. In: . [S.l.]: Springer, 1988. v. 3, n. 2, p. 95–99. Citado na página 33.
- HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. In: . [S.l.: s.n.], 1975. Citado na página 33.
- IEEE, S. et al. IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications. *Oct*, v. 31, p. 269, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*. [S.l.], 1995. v. 4, p. 1942–1948. Citado na página 37.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In: IEEE. *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1997. v. 5, p. 4104–4108. Citado na página 39.
- LOBO, F. D. *Adoção tecnológica: fatores de decisão de adoção da internet das coisas em ambiente empresarial*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015. Citado na página 21.
- MATHWORKS. *Matlab*. 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com.br/products-matlab>>. Citado na página 68.
- MITCHELL, M. *An introduction to genetic algorithms*. [S.l.]: MIT press, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.
- NATALE, R. Implementação de QoS para tecnologia de transmissão de dados em redes de Média Tensão. In: *Universidade Federal do Espírito Santo*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 25.
- NEZAMABADI-POUR, H.; ROSTAMI-SHAHRBABAHI, M.; MAGHFOORI-FARSANGI, M. Binary particle swarm optimization: challenges and new solutions. *CSI J Comput Sci Eng*, v. 6, n. 1, p. 21–32, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 37, 38, 39, 40, 41 e 68.

- OLIVEIRA, A. P. et al. Análise de Desempenho de um Modelo de Comunicação de Dados para Smart Grids em 13.8 kV de Indústrias de Petróleo e Gás. In: *12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas 24, 28, 47, 48, 51, 75 e 90.
- PÁDUA, F. J.; ROMERO, R.; RIDER, M. J. Alocação de Dispositivos PLC Numa Rede de Distribuição Elétrica de baixa Tensão Usando Programação Linear inteira Mista. 2012. Citado na página 53.
- PADUA, F. J. L. d. *Alocação de modem PLC utilizando SNR em uma rede elétrica de baixa tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014. Citado na página 53.
- PAPADOPOULOS, T. A. et al. Application of narrowband power-line communication in medium-voltage smart distribution grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 28, n. 2, p. 981–988, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 21, 28 e 29.
- PAVLIDOU, N. et al. Power line communications: state of the art and future trends. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 41, n. 4, p. 34–40, 2003. Citado na página 23.
- ROCHA, H. R. d. O. *Construção de plano de medição para estimação de estados em sistemas de potência via metaheurística*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal Fluminense (UFF), 2010. Citado na página 67.
- ROSTAMI-SHAHRBABA, M.; NEZAMABADI-POUR, H. New approach to binary PSO algorithm. In: *Proceedings of 14th Iranian Conference on Electrical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 41.
- SILVA, J. *Análise de desempenho de um sistema COFDM para comunicação via rede elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 28.
- SILVA, J.; SALLES, E.; SEGATTO, M. Análise de Desempenho de um Sistema COFDM para Comunicação de Dados via Rede de Energia Elétrica em Ambientes Internos. In: *4th International Information and 4th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, Florianópolis*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- SILVA, J. et al. Telemetria e supervisão via rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão: Estudo de caso. In: *CBA 2004 Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- SIQUEIRA, T. et al. Técnica OFDM Aplicada a Power Line communications. In: *II CITENEL—Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- TENG DIN, J. Distribution line carrier communications—an historical perspective. *IEEE transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 321–329, 1987. Citado na página 23.
- WHITE, T.; PAGUREK, B. Towards multi-swarm problem solving in networks. In: *IEEE. Multi Agent Systems, 1998. Proceedings. International Conference on*. [S.l.], 1998. p. 333–340. Citado na página 37.